



**Sérgio Filipe Ramos
Pereira**

**Análise de Ciclo de Vida do Hidrogénio – Cenários
Para Portugal**



**Sérgio Filipe Ramos
Pereira**

Análise de Ciclo de Vida do Hidrogénio

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Margarida Isabel Cabrita Marques Coelho, Professora Auxiliar Convidada do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

O júri

Presidente	Professor Doutor Robertt Angelo Fontes Valente Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro
Orientadora	Professora Doutora Margarida Isabel Cabrita Marques Coelho Professora auxiliar convidada do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro
Arguente	Profossor Doutor Fausto Miguel Cereja Seixas Freire Professor auxiliar no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Agradecimentos

No decorrer da presente Dissertação foram várias as pessoas que contribuíram, de diferentes formas, para que esta fosse executada com sucesso.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à minha orientadora, a Professora Doutora Margarida Coelho, não só por todo o apoio e disponibilidade demonstrada mas também por todas as críticas construtivas.

O meu agradecimento ao Engenheiro Lúcio Tavares e ao Arménio Silva, pelo apoio e compreensão demonstrados.

Um agradecimento à Engenheira Ana Margarida Caeiro da Galp Energia, pelo apoio, colaboração e fornecimento de alguns dados inerentes ao desenvolvimento da Dissertação.

O meu agradecimento à minha namorada, Tânia Margarida, pelo consistente apoio, motivação e principalmente por toda a paciência.

Por último, mas não menos importante, um agradecimento muito especial aos meus pais e ao meu irmão pois são o pilar do presente trabalho. Um muito obrigado por todo o apoio, todos os incentivos, pela paciência e pela compreensão demonstrada.

Palavras-chave

Análise de Ciclo de Vida, Combustíveis alternativos, Consumo energético, Hidrogénio, WTP, WTW.

Resumo

A elevada dependência energética da nossa sociedade tem levantado problemas ambientais e económicos devido à escassez dos combustíveis fósseis. O sector dos transportes é o que tem maior impacto ambiental e energético. Iniciativas como o Protocolo de Quioto, a aposta dos fabricantes em combustíveis alternativos e novas tecnologias de propulsão e o incentivo das autarquias para a mobilidade sustentável são o exemplo de uma crescente política energético-ambiental.

Com a Análise de Ciclo de Vida (ACV) é possível contabilizar os consumos energéticos e as emissões de poluentes de um combustível desde a sua produção até à sua utilização nos veículos. Este facto permite verificar os desempenhos energéticos e ambientais de um combustível alternativo face aos convencionais.

O hidrogénio (H_2) apresenta uma combustão limpa, facto importante para a utilização em veículos. Grande parte dos fabricantes de automóveis tem dedicado as suas investigações na criação de um veículo a H_2 . Contudo a inexistência do H_2 na sua forma mais pura tornam-o objecto de estudo.

O principal objectivo da presente Dissertação de Mestrado consiste em actualizar a ferramenta de ACV GREET (desenvolvida pelo Argonne National Laboratory), uma vez que este contempla a realidade Americana, de forma a efectuar a ACV do H_2 . Para obter os consumos energéticos e emissões de poluentes da produção dos painéis fotovoltaicos e das torres eólicas consultou-se o modelo GEMIS (desenvolvido pelo Oto-Istitute), que conjugado com a actualização do GREET origina o MACV2 H_2 . Este após calibrado é submetido a um caso de estudo baseado no percurso do Oceanário (Lisboa) à Casa da Música (Porto) com veículos ligeiros de passageiros.

A utilização de energia eólica é a melhor forma de produção de H_2 quer em consumos energéticos quer em emissões de poluentes. O H_2 produzido por electrólise de electricidade proveniente da energia eólica e aplicado em veículos com pilhas de combustível (FCV) apresenta mesmo melhores resultados que o veículo com motor de combustão interna a gasolina (ICE), com excepção da emissão de PM por quilómetro. As emissões de GEE por quilómetro são 85% inferiores às do veículo com ICE a gasolina. A produção de H_2 por electrólise com electricidade proveniente do sistema electroprodutor nacional é a que apresenta piores resultados na análise da fonte-ao-depósito (WTP) e da fonte-à-roda (WTW). Este H_2 aplicado em FCV apresenta emissões de GEE por quilómetro 43% superiores às do veículo com ICE a gasolina.

Keywords

Life Cycle Analysis, Alternative fuels, Energy consumption, Hydrogen, WTP, WTW.

Abstract

The high energy dependence of our society has raised environmental and economic problems due to the shortage of fossil fuels. The transport sector has the greatest energy and environmental impact. Initiatives such as Kyoto Protocol, car manufacturers' investments in alternative fuels and new propulsion technologies and the encouragement of local sustainable mobility are the example of a growing energy and environmental policy.

Life Cycle Analysis (LCA) gives the possibility to take into account energy consumption and pollutant emissions of an alternative fuel from its production to the use in vehicles and to perform the comparison of its energetic and environmental performance with a conventional fuel.

Hydrogen (H_2) has a clean combustion, important fact for use in vehicles. Much of car manufacturers has devoted their research to create a hydrogen vehicle. However the H_2 purest absence become this study object.

The main objective of this Master Thesis is to update the LCA tool GREET (developed by Argonne National Laboratory), since this includes the American reality, in order to perform the LCA of H_2 . For energy consumption and pollutant emissions in the production of photovoltaic panels and wind towers consulted the GEMIS model (developed by Oto-Istitute), which along with the update of GREET model originate MACV2 H_2 . After the calibration MACV2 H_2 was applied to a case-study based on the route from Oceanarium (Lisbon) to the Music House (Porto), with passenger cars.

It was concluded that the use of wind energy is the best way to produce H_2 , both in terms of energy consumption and pollutant emissions. The H_2 produced by electrolysis of electricity from wind energy and applied in fuel cell vehicles (FCV) presents better results than the internal combustion engine (ICE) gasoline vehicle, with the exception of the emission of PM per kilometer. The greenhouse gases (GHGs) emissions per kilometer are 85% lower than the ICE vehicle. The production of hydrogen by electrolysis with electricity of Portuguese power generation system presents the worse well-to-pump (WTP) and well-to-wheel (WTW) results (this H_2 applied in FCV presents an increase of 43% in GHG emissions per kilometer when compared with the ICE gasoline vehicle).

Índice

Índice de Figuras	1
Índice de Quadros	4
Nomenclatura.....	7
1. Introdução	9
1.1. Situação Energética	9
1.2. Situação Energética em Portugal	12
1.3. Sector dos transportes	14
1.4. O Protocolo de Quioto	17
1.5. Objectivos	18
1.6. Estrutura da Dissertação	18
2. O Hidrogénio	21
2.1. O Hidrogénio no Sector dos Transportes	21
2.2. Propriedades do Hidrogénio	23
2.3. Matérias-Primas	27
2.4. Produção do Hidrogénio	27
2.5. Armazenamento do Hidrogénio	38
2.6. Transporte do Hidrogénio	40
2.7. O Hidrogénio em Portugal	41
2.8. Revisão Bibliográfica	42
3. Análise do Ciclo de Vida	45
4. Metodologia	51
4.1. Plano de trabalho	51
4.2. O modelo GREET	54
4.3. O modelo GEMIS	59
4.4. O modelo NETPAS	61
4.5. O modelo MACV2H ₂	61
4.5.1. Apresentação	62
4.5.2. Dados de Entrada	64
4.5.3. Combustíveis	68
4.5.4. FE	71
4.5.5. Petróleo	74
4.5.6. Gás Natural	77
4.5.7. Carvão	78
4.5.8. Etanol	80
4.5.9. Electricidade	82
4.5.10. Fotovoltaico	84
4.5.11. Eólica	85
4.5.12. Hidrogénio	85

4.5.13.	Fertilizantes	89
4.5.14.	Compressão	91
4.5.15.	Transporte.....	91
4.5.16.	Veículos	92
4.5.17.	Resultados.....	94
4.5.18.	Gráficos	96
4.5.19.	Percurso	96
4.5.20.	Base de dados	96
5.	Resultados e sua Discussão	97
5.1.	Calibração do modelo.....	97
5.2.	Análise de ciclo de vida do hidrogénio	102
6.	Conclusões e Trabalho Futuro	141
7.	Referências	147
	Anexos.....	153

Índice de Figuras

Figura 1 – Evolução do consumo de energia primária (milhões de tep) [1].	9
Figura 2 – Distribuição do consumo de combustível pelas diversas zonas mundiais em 2008 [1].	10
Figura 3 – Consumo de energia primária por fonte e por zonal mundial em 2008 [1].	10
Figura 4 – Evolução dos custos do barril de petróleo ao longo dos anos [1].	11
Figura 5 – Produção Mundial de Petróleo [2].	12
Figura 6 – Consumo de energia primária em Portugal [4].	12
Figura 7 – Produção de Energia em Portugal [4].	13
Figura 8 – Consumos de energia primária por sector em Portugal em 2007 [4].	13
Figura 9 – Evolução das emissões nos transportes rodoviários Europeus [6].	14
Figura 10 – Consumo de energia final por modo de transporte em Portugal (Mtep) [7].	15
Figura 11 – Contribuição relativa do sector dos transportes para as emissões dos principais poluentes e para a quota de utilização de energia, em Portugal e na UE-27, 2006 [7].	16
Figura 12 – Evolução das emissões de GEE (1990 / 2010), estimadas para o Cenário de Referência [9].	16
Figura 13 – Metas estipuladas pelo Protocolo de Quioto para os GEE [10].	17
Figura 14 – Limites de inflamabilidade do hidrogénio com a variação da temperatura [19].	26
Figura 15 – Processo de conversão de metano em hidrogénio – reformação a vapor [23].	28
Figura 16 – Processo de electrólise alcalina [28].	31
Figura 17 – Electrólise de polímero de membrana electrolítica [29].	32
Figura 18 – Electrólise de alta temperatura [30].	33
Figura 19 – Esquematização da fotólise da água [33].	34
Figura 21 – Representação esquemática do processo de biofotólise indirecta [35].	35
Figura 20 – Esquema da biofotólise directa.	35
Figura 22 – Processos de captura de dióxido de carbono [38].	36
Figura 23 – Armazenamento do dióxido de carbono [38].	37
Figura 24 – Esquematização da produção centralizada de H ₂ com captura e armazenamento de CO ₂ [21].	37
Figura 25 – Principais fases associadas ao ciclo de vida de um produto [67].	45
Figura 26 - Principais fases de uma ACV, segundo a norma ISO 14040 [67].	46
Figura 27 – Representação da interacção entre o sistema e o ambiente [67].	47
Figura 28 – Categorias do impacte ambiental [67].	48
Figura 29 – Estrutura do mecanismo ambiental associado ao Ecoindicador 95 [67].	49
Figura 30 – Representação da comunicação do GREET com a base de dados do GEMIS, originando o MACV2H ₂ .	52
Figura 31 – Fluxograma do plano de trabalho da Dissertação.	53
Figura 32 – Calendarização do plano de trabalho da Dissertação.	53

Figura 33 – Representação da análise de ciclo de vida efectuada pelo GREET [69].	54
Figura 34 – Aspecto da folha de visão geral do modelo GREET 1.8c_0.	55
Figura 35 – Esquema das vias de produção de combustíveis considerados no modelo GREET.	58
Figura 36 – Esquema de comunicação da folha de cálculo Hydrogen.	59
Figura 37 – Esquema das formas de produção de hidrogénio consideradas no GREET.	59
Figura 38 – Ambiente inicial da janela de trabalho do modelo GEMIS.	60
Figura 39 – Aspecto da folha de cálculo “Apresentação” do modelo MACV2H ₂ .	63
Figura 40 – Selecção da quantidade de energia libertada por unidade de massa/volume.	64
Figura 41 – Dados relativos à produção de H ₂ .	64
Figura 42 – Dados relativos à simulação a efectuar.	66
Figura 43 – Dados relativos ao transporte de matérias-primas/combustíveis.	68
Figura 44 – Primeiro ponto da folha de cálculo “Petróleo”, que apresenta o peso entre crude e GN na produção de GPL.	74
Figura 45 – Células de selecção do processo de produção de etanol para os tipos de biomassa incluídos no MACV2H ₂ .	81
Figura 46 – Comparação dos consumos energéticos totais WTP (com G.H ₂).	105
Figura 47 – Comparação dos consumos energia fóssil WTP (com G.H ₂).	106
Figura 48 – Comparação dos consumos energéticos totais WTP (com L.H ₂).	107
Figura 49 – Comparação dos consumos energia fóssil WTP (com L.H ₂).	107
Figura 50 – Rácio do consumo de energia para produção de G.H ₂ por GN.	108
Figura 51 – Rácio do consumo de energia para produção de G.H ₂ por GN (estações).	108
Figura 52 – Rácio do consumo de energia para produção de G.H ₂ por Biomassa.	108
Figura 53 – Rácio do consumo de energia para produção de G.H ₂ por Carvão.	108
Figura 54 – Rácio do consumo de energia para produção de G.H ₂ por energia eólica.	109
Figura 55 – Rácio do consumo de energia para produção de G.H ₂ por PV.	109
Figura 56 – Rácio do consumo de energia para produção de L.H ₂ por GN.	110
Figura 57 – Rácio do consumo de energia para produção de G.H ₂ por GN (estações).	110
Figura 58 – Rácio do consumo de energia para produção de L.H ₂ por Carvão.	110
Figura 59 – Rácio do consumo de energia para produção de L.H ₂ por Biomass.	110
Figura 60 – Rácio do consumo de energia para produção de L.H ₂ por energia eólica.	111
Figura 61 – Rácio do consumo de energia para produção de L.H ₂ por PV.	111
Figura 62 – Comparação da emissão de VOC numa análise WTP (com G.H ₂).	113
Figura 63 – Comparação da emissão de VOC numa análise WTP (com L.H ₂).	113
Figura 64 – Comparação da emissão de CO numa análise WTP (com G.H ₂).	114
Figura 65 – Comparação da emissão de CO numa análise WTP (com L.H ₂).	115
Figura 66 – Comparação da emissão de NO _x numa análise WTP (com G.H ₂).	116
Figura 67 – Comparação da emissão de NO _x numa análise WTP (com L.H ₂).	116
Figura 68 – Comparação da emissão de PM numa análise WTP (com G.H ₂).	117
Figura 69 – Comparação da emissão de PM numa análise WTP (com L.H ₂).	117
Figura 70 – Comparação da emissão de GEE numa análise WTP (com G.H ₂).	119
Figura 71 – Comparação da emissão de GEE numa análise WTP (com L.H ₂).	119

Figura 72 – Consumos energéticos WTW, com o H ₂ produzido do carvão.....	121
Figura 73 – Consumos energéticos WTW, com o H ₂ produzido do GN.	121
Figura 74 – Consumos energéticos WTW, com o H ₂ produzido por electrólise.....	122
Figura 75 – Consumos energéticos WTW, com o H ₂ produzido da biomassa.....	123
Figura 76 – Emissão de VOC WTW, com o H ₂ produzido do carvão.	124
Figura 77 – Emissão de VOC WTW, com o H ₂ produzido do GN.....	124
Figura 78 – Emissão de VOC WTW, com o H ₂ produzido por electrólise.....	125
Figura 79 – Emissão de VOC WTW, com o H ₂ produzido da biomassa.	125
Figura 80 – Emissão de CO WTW, com o H ₂ produzido do carvão.....	126
Figura 81 – Emissão de CO WTW, com o H ₂ produzido do GN.....	127
Figura 82 – Emissão de CO WTW, com o H ₂ produzido por electrólise.....	127
Figura 83 – Emissão de CO WTW, com o H ₂ produzido da biomassa.....	128
Figura 84 – Emissão de NO _x WTW, com o H ₂ produzido do carvão.	129
Figura 85 – Emissão de NO _x WTW, com o H ₂ produzido do GN.	129
Figura 86 – Emissão de NO _x WTW, com o H ₂ produzido por electrólise.	130
Figura 87 – Emissão de NO _x WTW, com o H ₂ produzido da biomassa.	130
Figura 88 – Emissão de PM WTW, com o H ₂ produzido do carvão.....	131
Figura 89 – Emissão de PM WTW, com o H ₂ produzido do GN.....	132
Figura 90 – Emissão de PM WTW, com o H ₂ produzido por electrólise.....	132
Figura 91 – Emissão de PM WTW, com o H ₂ produzido da biomassa.....	133
Figura 92 – Emissão de GEE WTW, com o H ₂ produzido do carvão.....	134
Figura 93 – Emissão de GEE WTW, com o H ₂ produzido do GN.....	134
Figura 94 – Emissão de GEE WTW, com o H ₂ produzido por electrólise.....	135
Figura 95 - Emissão de GEE WTW, com o H ₂ produzido da biomassa.	136
Figura 96 – Distribuição do consumo de energia total WTW nas várias etapas.	137
Figura 97 – Distribuição da emissão de GEE (WTW) nas várias etapas.	138

Índice de Quadros

Quadro 1 – Densidades de alguns combustíveis [19].	23
Quadro 2 – Volume específico de alguns combustíveis.	24
Quadro 3 – Razão de expansão de alguns combustíveis.	24
Quadro 4 – Poder calorífico superior e inferior dos combustíveis [20].	24
Quadro 5 – Número de octanas de alguns combustíveis [19].	25
Quadro 6 – Valores de LII e LSI de alguns combustíveis à temperatura atmosférica [19].	26
Quadro 7 – Temperatura de auto-ignição de alguns combustíveis [19].	26
Quadro 8 – Propriedades dos combustíveis líquidos [71].	69
Quadro 9 – Propriedades dos combustíveis gasosos [71].	69
Quadro 10 – Propriedades dos combustíveis líquidos [71].	69
Quadro 11 – Factores de aquecimento global [73].	70
Quadro 12 – Massa atómica de alguns elementos [74].	71
Quadro 13 – Fracções de carbono e enxofre dos poluentes.	71
Quadro 14 – Factores de emissão para as tecnologias estacionárias (1/3) [71, 75].	71
Quadro 15 – Factores de emissão para as tecnologias estacionárias (2/3) [71, 75].	72
Quadro 16 – Factores de emissão para as tecnologias estacionárias (3/3) [71, 75].	72
Quadro 17 – Factores de emissão para o gasoduto a GN [75].	73
Quadro 18 – Factores de emissão para o comboio a gasóleo [76].	73
Quadro 19 – Factores de emissão para os petroleiros e os navios de transporte a fuel óleo [71].	74
Quadro 20 – Peso relativos das tecnologias estacionárias na produção de combustíveis [71].	75
Quadro 21 – Valores da eficiência global e emissões urbanas para o petróleo e seus derivados [71, 75, 77].	75
Quadro 22 – Peso relativo dos combustíveis nos processos de extracção de petróleo e produção de seus derivados [71].	76
Quadro 23 – Pesos relativos das tecnologias estacionárias na extracção e processamento do GN e produção de GPL [71].	77
Quadro 24 – Valores da eficiência global e emissões urbanas para GN e GPL [71, 75, 77].	77
Quadro 25 – Peso relativo dos combustíveis nos processos de extracção e processamento de GN e produção de GPL [71].	78
Quadro 26 – Pesos relativos das tecnologias estacionárias na extracção e processamento do carvão [71].	79
Quadro 27 – Valores da eficiência global e emissões urbanas para o carvão [71, 75].	79
Quadro 28 – Peso relativo de cada um dos combustíveis nos processos de extracção e processamento do carvão [71].	79
Quadro 29 – Peso relativo das tecnologias de combustão estacionária nos processos de produção de etanol a partir de biomassa [71].	80
Quadro 30 – Peso relativo de cada um dos combustíveis no processo de agricultura da biomassa [71].	81

Quadro 31 – Peso relativo por fonte energética na produção de energia eléctrica em Portugal [4].	82
Quadro 32 – Valores das emissões urbanas para cada um dos combustíveis inerentes à produção eléctrica em Portugal [71].	83
Quadro 33 – Pesos relativos e eficiência das tecnologias de combustão estacionária na produção eléctrica [71].	83
Quadro 34 – Factores de emissão por unidade de energia eléctrica produzida.	83
Quadro 35 – Consumos energéticos na produção de painéis fotovoltaicos incluído na produção de electricidade por parte destes [75].	84
Quadro 36 – Emissões de poluentes na produção de painéis fotovoltaicos incluído na produção de electricidade por parte destes [75].	84
Quadro 37 – Consumos energéticos na produção de torres eólicas incluído na produção de electricidade por parte destas [75].	85
Quadro 38 – Emissões de poluentes na produção de torres eólicas incluído na produção de electricidade por parte destas [75].	85
Quadro 39 – Pesos relativos das tecnologias de combustão estacionária na produção de hidrogénio gasoso [71].	86
Quadro 40 – Pesos relativos das tecnologias de combustão estacionária na produção de hidrogénio líquido [71].	87
Quadro 41 – Eficiência global dos processos de produção de H ₂ [23, 29, 71, 79, 80].	87
Quadro 42 – Valores de eficiência global de processos inerentes à produção de H ₂ [81, 82].	88
Quadro 43 – Valores do peso relativo dos combustíveis no processo de produção de H ₂ em plantas centralizadas [71].	89
Quadro 44 – Valores do peso relativo dos combustíveis no processo de produção de H ₂ em estações de reabastecimento [71].	89
Quadro 45 – Peso relativos das tecnologias de combustão estacionária na produção dos fertilizantes, herbicidas e insecticidas [71].	90
Quadro 46 – Factores de emissão e de consumo dos motociclos a dois tempos a gasolina com cilindrada inferior a 50 cm ³ [84].	94
Quadro 47 – Dados do BMW mono-fuel hydrogen [85].	97
Quadro 48 – Comparação do consumo do BMW mono-fuel hydrogen com os dados do modelo MACV2H ₂ .	98
Quadro 49 – Especificações do Fiat Panda hydrogen 3 ^a geração [86].	98
Quadro 50 – Comparação do consumo do Fiat Panda hydrogen 3 ^a geração com os dados do modelo MACV2H ₂ .	98
Quadro 51 – Especificações do Quantum Prius [87, 88].	99
Quadro 52 – Comparação do consumo do Quantum Prius com os dados do modelo MACV2H ₂ .	99
Quadro 53 – Comparação do consumo da Scooter ZES com os dados do modelo MACV2H ₂ .	100
Quadro 54 – Especificações do Mercedes Citaro 2002 [44].	100
Quadro 55 – Comparação do consumo do Mercedes Citaro com os dados do modelo MACV2H ₂ .	100

Quadro 56 – Comparação do consumo do MAN NL 263 FC com os dados do modelo MACV2H ₂ .	101
Quadro 57 – Extensão do gasoduto a GN no exterior de Portugal desde a Argélia [94].	103
Quadro 58 – Distância e meio de importação do petróleo bruto e do carvão.	104
Quadro 59 – Local de importação de fertilizantes, herbicidas e insecticidas.	104
Quadro 60 – Consumo de energia nos processos de compressão, liquefacção e transporte do H ₂ .	112
Quadro 61 – Resumo da análise WTP do H ₂ relativamente à gasolina.	120
Quadro 62 – Resumo WTW para veículos ICE a G.H ₂ comparativamente ao ICE a gasolina.	138
Quadro 63 – Resumo WTW para veículos ICE a L.H ₂ comparativamente ao ICE a gasolina.	139
Quadro 64 – Resumo WTW para veículos FCV a G.H ₂ comparativamente ao ICE a gasolina.	139
Quadro 65 – Resumo WTW para veículos FCV a L.H ₂ comparativamente ao ICE a gasolina.	139
Quadro 66 – Variações nas emissões WTP do G.H ₂ relativamente à gasolina.	144
Quadro 67 – Variações nas emissões WTP do L.H ₂ relativamente à gasolina.	144
Quadro 68 – Variação no consumo energético e nas emissões WTW, dos veículos a G.H ₂ relativamente ao ICE a gasolina.	145

Nomenclatura

ACV – Análise de Ciclo de Vida

AP2H2 – Associação Portuguesa para a Promoção do Hidrogénio

CaCO₃ – Carbonato de cálcio

CCS – Captura e armazenamento do dióxido de carbono

CH₄ – Metano

C₇H₈ – Tolueno

C₇H₁₄ – Metilciclohexano

CO – Monóxido de carbono

CO₂ – Dióxido de carbono

CUTE – Clean Urban Transport for Europe

DALY – “*Disability Adjusted Life Years*”

e⁻ – Electrões

ECTOS – Ecological City TranspOrt System

FCV – Veículos a célula de combustível

fd – Ferredoxina

GEE – Gases de Efeito de Estufa

GEMIS – Global Emission Model for Integrated Systems

G.H₂ – Hidrogénio gasoso

GN – Gás Natural

GREET – Greenhouse gases, Regulated Emissions and Energy use in Transportation

H⁺ – Iões hidrogénio

H₂ – Hidrogénio

H₂O – Água

HC – Hidrocarbonetos

HEV – Veículo híbrido eléctrico

HTS – Reacção de mudança de alta temperatura “*High temperature shift*”

HyChain – Hydrogen Challenge

HyFLEET CUTE – Hydrogen for Clean Urban Transport for Europe

ICE – Veículo de combustão interna

ICV – Inventário de Ciclo de Vida

IGCC – Ciclo combinado de gaseificação integrada

ISO – International Organization for Standardization

K₂O – Óxido de potássio

L.H₂ – Hidrogénio líquido

LII – Limite inferior de inflamabilidade

LSI – Limite superior de inflamabilidade

LTS – Reacção de mudança de baixa temperatura “*Low temperature shift*”

MEA – Metiletanolamina

N₂ – Azoto

N₂O – Óxido nitroso

NaBH₄ – Tetrahidroborato de sódio (borohidreto)

NaBO₂ – Metaborato de sódio
NO_x – Óxidos de azoto
O²⁻ - iões oxigénio
O₂ – Oxigénio
O₃ – Ozono
OH⁻ – Iões hidróxido
OPEP – Organização dos Países Exportadores de Petróleo
P₂O₅ – Pentóxido de fósforo
PAG – Potencial de Aquecimento Global
PCI – Poder calorífico inferior
PCS – Poder calorífico superior
PEM – Polímero de Membrana Electrolítica
PHEV – Veículo Plug-in híbrido eléctrico
PIB – Produto Interno Bruto
PM_{2,5} – Partículas com tamanho inferior a 2,5 µm
PM₁₀ – Partículas com tamanho inferior a 10 µm
PSA – Sistema de adsorção com modelação de pressão
PSI – Fotossistema I
PSII – Fotossistema II
PTN – Condições normais de pressão e temperatura
SO₂ – Dióxido de enxofre
SO_x – Óxidos de enxofre
STCP – Sociedade de Transporte Colectivos do Porto
STEP – Sustainable Transport Energy Project
UE – União Europeia
WTP – Fonte-ao-depósito “*Well To Pump*”
WTW – Fonte-à-roda “*Well To Wheels*”

1. Introdução

1.1. Situação Energética

A forte dependência energética sentida actualmente levanta alguns problemas não só de carisma ambiental como de escassez de fontes de recursos energéticos. O constante aumento dos recursos primários pode ser observado na figura seguinte.

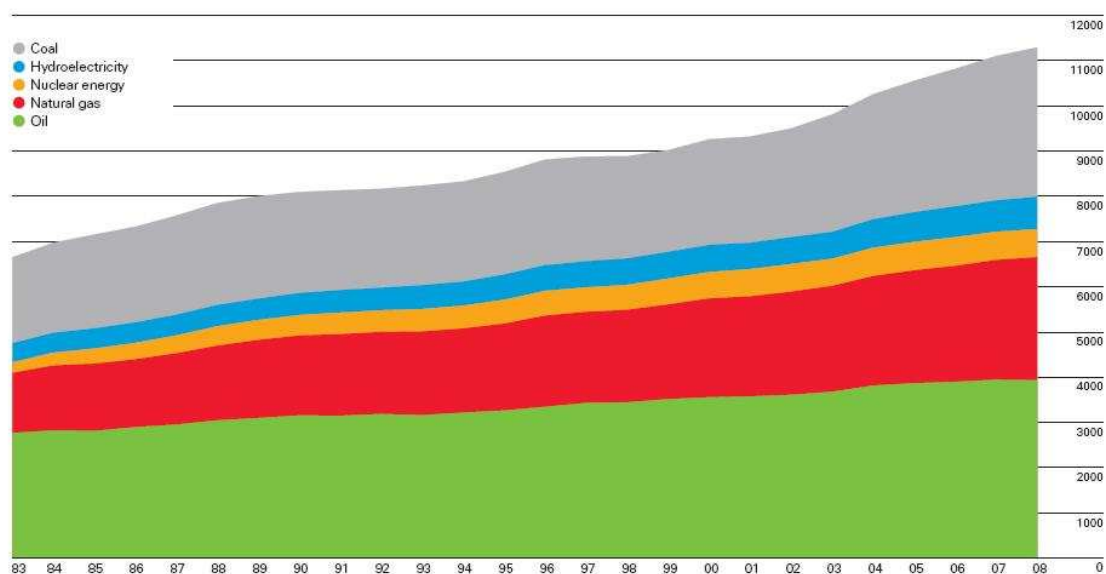


Figura 1 – Evolução do consumo de energia primária (milhões de tep) [1].

Apesar do constante aumento do consumo mundial de energia primária, em 2008 o crescimento verificado foi de 1,4% sendo desta forma o crescimento mais lento desde 2001 [1]. Verifica-se que o petróleo continua o combustível dominante.

Na última década a percentagem de consumo mundial de petróleo face aos restantes recursos energéticos primários baixou de 38,7% para 34,8%. De salientar ainda o facto do consumo mundial de petróleo em 2008 ter sofrido um decréscimo de 0,6%, sendo este o primeiro declínio no consumo mundial deste recurso primário desde 1993. Apesar deste decréscimo no consumo mundial de petróleo, o aumento do consumo mundial de energia primária justifica-se pelo aumento do consumo mundial de gás natural (GN) [1].

No caso do carvão, apesar do seu consumo mundial em 2008 ter abrandado, manteve-se o combustível com o crescimento mais rápido em seis anos consecutivos.

Relativamente ao consumo de gás natural a China foi o país que maior crescimento apresentou, sendo este de 15,8% em 2008.

Na figura seguinte é possível verificar a distribuição do consumo de combustíveis primários nas diversas zonas do mundo.

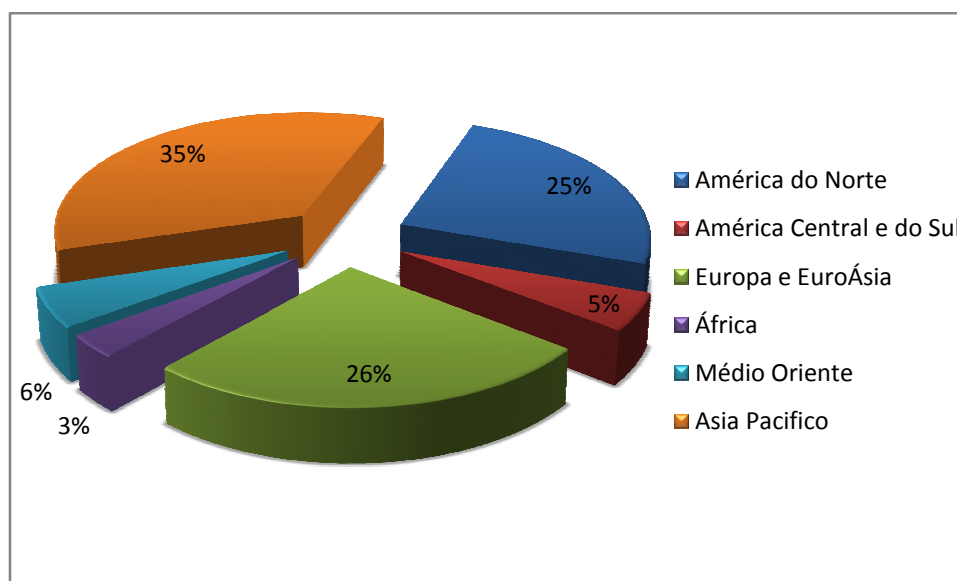


Figura 2 – Distribuição do consumo de combustível pelas diversas zonas mundiais em 2008 [1].

A zona da Ásia Pacífico, em 2008, apresentou-se como a maior consumidora de fontes energia primária, comparativamente com as restantes zonas mundiais. Logo de seguida apresenta-se a Europa e EuroÁsia. Contudo, como se pode observar na figura seguinte, nesta zona o consumo de energia primária encontra-se repartido entre várias fontes [1]. Na zona da Ásia Pacífico 51% do consumo corresponde a carvão, tendo ainda esta zona a agravante de a China e Índia serem países com uma Economia Emergente.

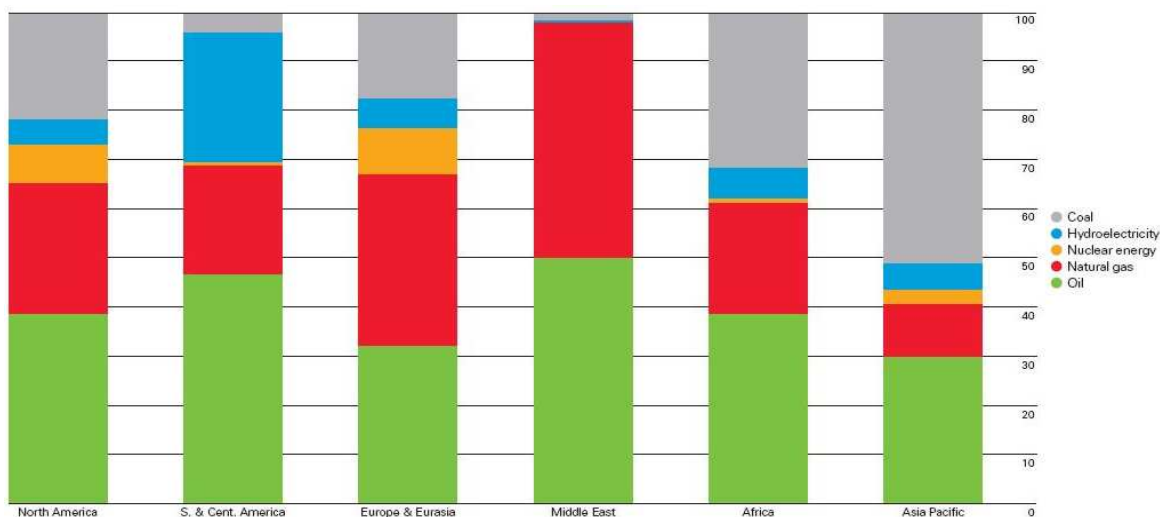


Figura 3 – Consumo de energia primária por fonte e por zonal mundial em 2008 [1].

No Médio Oriente os consumos são regidos essencialmente por duas fontes primárias, o petróleo e o gás natural que apresentam respectivamente 50% e 48% dos consumos de fontes de energia primária. No entanto o consumo total desta zona apresenta apenas 6% do consumo mundial de energia primária.

Como se verifica pela análise das Figuras 1 e 3 os consumos mundiais de energia primária incidem essencialmente sobre os combustíveis fósseis, sendo estes compostos carbonados não renováveis.

A dependência de combustíveis fósseis demonstrada acima torna-se preocupante quer num ponto de vista ambiental, quer num ponto de vista económico. Esta dependência é alarmante do ponto de vista económico, uma vez que o preço destes é altamente instável e dependente de vários factores externos.

Na figura seguinte é possível verificar a evolução do preço do barril de petróleo ao longo dos anos, o qual apresentou oscilações desde 1861.

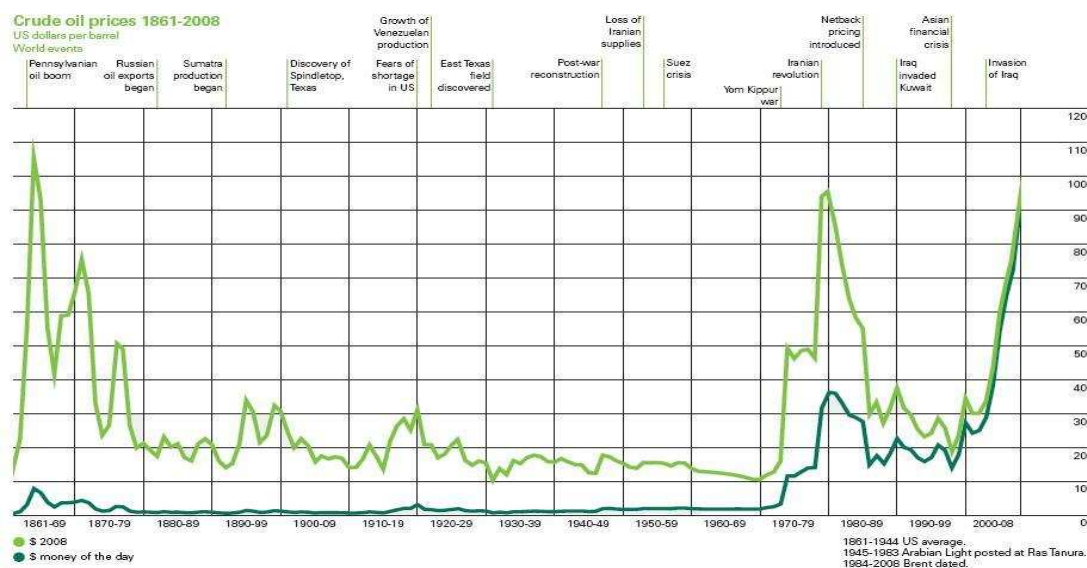


Figura 4 – Evolução dos custos do barril de petróleo ao longo dos anos [1].

Em 1973 iniciou-se a primeira subida acentuada no preço do barril de petróleo, que apresentou um pico em 1980 e culminou em 1986. Esta subida foi impulsionada pela guerra do Egipto e da Síria contra o Iraque, que levou a que a OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo) embarga-se da exportação de petróleo. O pico do preço do barril ocorreu na altura da revolução Iraniana (iniciada em 1979).

Em 1990, devido à guerra do Golfo (invasão do Iraque ao Kuwait), ocorreu uma nova crise energética que culminou em 1991.

A mais recente crise energética foi provocada pela crise financeira sentida em todo o mundo, na qual os movimentos especulativos em torno do petróleo levaram a que este em 2008 atingisse valores recorde.

Muitas das projecções apontam para um “pico do petróleo” para breve. Cerca de 50 dos 90 países produtores de petróleo produzem actualmente menos do que já produziram, ver Figura 5 [2]. O “pico do petróleo” significa a altura em que a produção deste atinge o valor máximo. Dada dependência actual da sociedade relativamente ao petróleo, esta

não se encontra preparada para o “pico do petróleo” podendo ocorrer um colapso mundial.

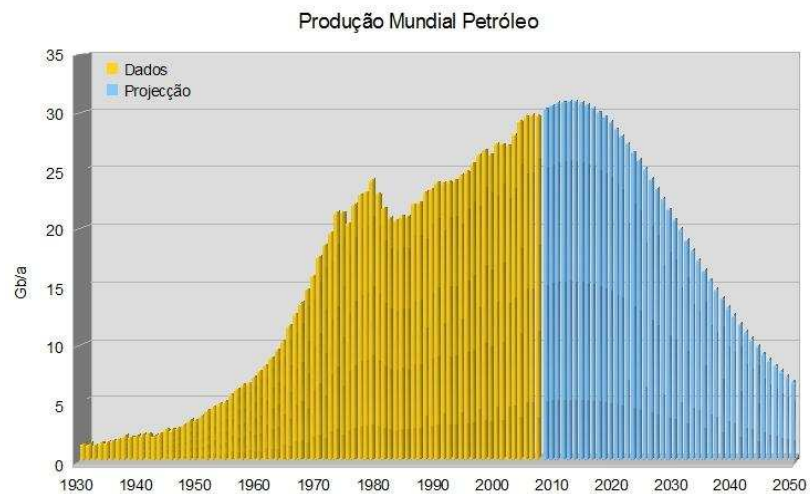


Figura 5 – Produção Mundial de Petróleo [2].

1.2. Situação Energética em Portugal

Portugal é um país com um consumo de energia primária próximo dos 25 Mtep, dos quais cerca de 83% são importações [3]. A figura seguinte demonstra a evolução do consumo de energia primária em Portugal.

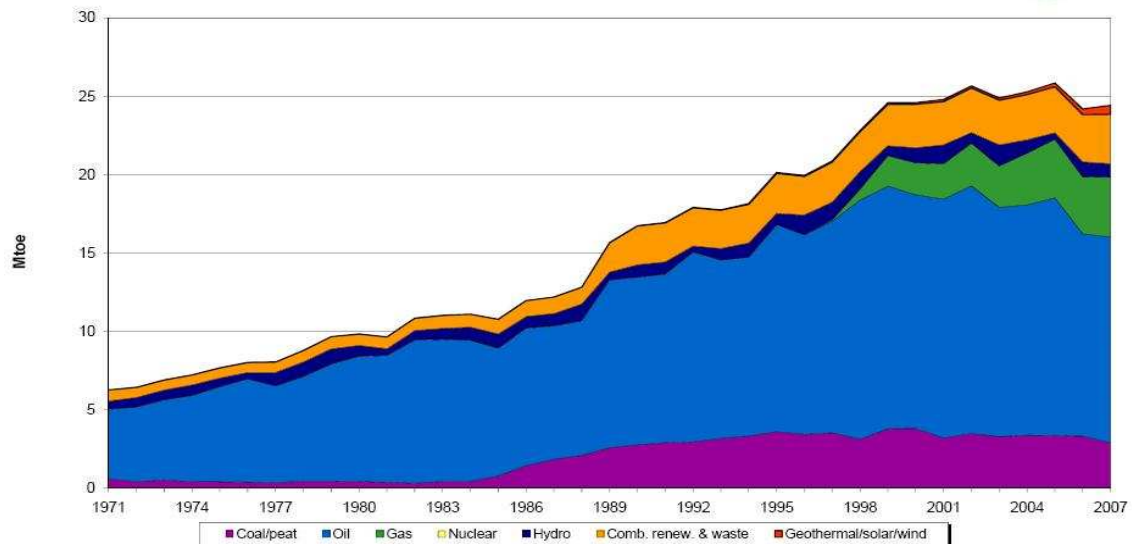


Figura 6 – Consumo de energia primária em Portugal [4].

Por análise da Figura 6 verifica-se a forte dependência nacional do petróleo, situação contrastante com as reservas nacionais de recursos fósseis.

A produção de energia em Portugal é muito inferior ao consumo requerido pelo país, como pode ser observado na Figura 7.

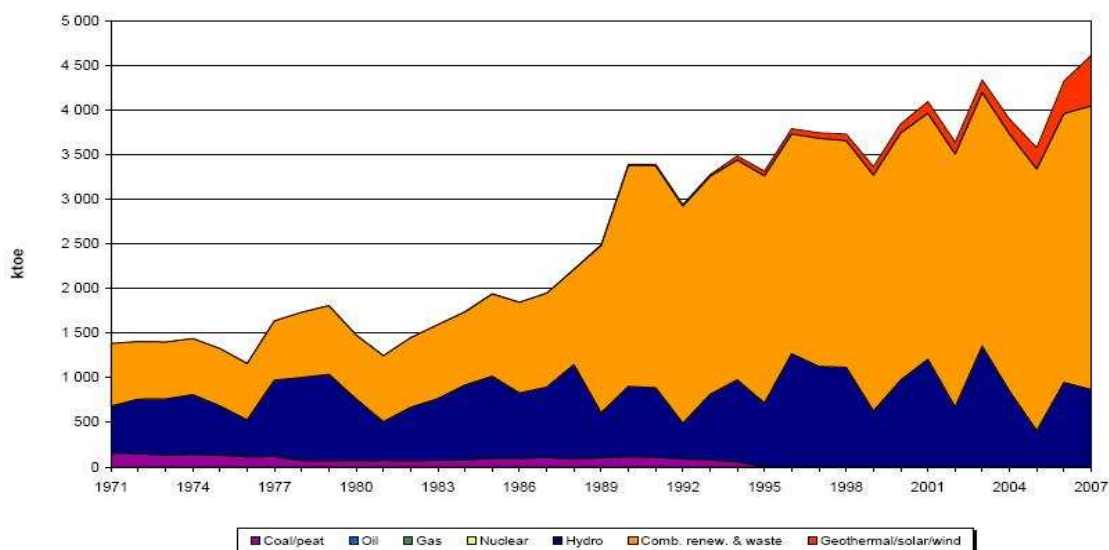


Figura 7 – Produção de Energia em Portugal [4].

Os baixos níveis de intensidade energética e carbónica, expressos em consumo de energia primária e emissão de gases de efeito de estufa (GEE) por unidade de PIB (Produto Interno Bruto) respectivamente, traduzem um desenvolvimento económico e sustentável. A economia portuguesa tem apresentado para além da referida dependência de energia primária vinda do exterior, elevadas intensidades energéticas e carbónicas, relativamente às médias da União Europeia (EU – 27) [5].

Apesar da grande diferença entre a produção e o consumo de energia primária, Portugal possui um consumo de energia por habitantes de 2,36tep/habitante, sendo este inferior ao da EU 27 que é 3,55 tep/habitante [4].

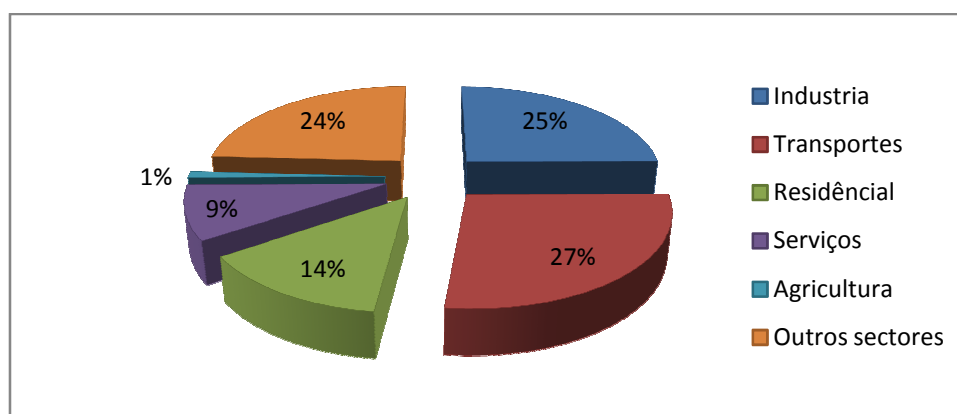


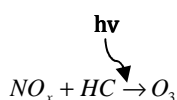
Figura 8 – Consumos de energia primária por sector em Portugal em 2007 [4].

Por análise da Figura 8 verifica-se que o sector que representa maior consumo de energia primária em Portugal é o dos transportes. O sector dos transportes representa 27% do consumo de energia primária em Portugal, sendo que 97% são referentes a combustíveis fósseis [4]. Este sector necessita de um enfoque especial, pois apesar de toda a investigação e inovação efectuadas no sector não são suficientes para que este deixe de ser o sector que mais contribui para as emissões de GEE.

1.3. Sector dos transportes

O sector dos transportes é um dos grandes contribuidores para a poluição atmosférica, emitindo grandes quantidades de poluentes prejudiciais para a saúde, quer a curto quer a longo prazo.

Os poluentes locais, ou seja, que têm um impacto directo na saúde humana são o monóxido de carbono (CO), os óxidos de azoto (NO_x), as partículas (PM) e os hidrocarbonetos (HC). O CO é prejudicial uma vez que a hemoglobina consegue captar melhor o CO que o oxigénio (O₂), provocando desta forma asfixia. As PM também são prejudiciais uma vez que inaladas provocam problemas respiratórios, sendo que, quanto mais pequenas forem piores são para a saúde. O NO_x e os HC são muito prejudiciais quando reagem juntamente com os raios ultravioleta (ver Equação 1), formando ozono (O₃).



Equação 1

O O₃ formado a partir da reacção estabelecida na Equação 1 provoca cansaço e problemas nas vias respiratórias. Estes poluentes proporcionam efeitos nefastos para a saúde a curto prazo.

No entanto também há emissão de outros poluentes, como é o caso do dióxido de carbono (CO₂) e do metano (CH₄), que têm um impacto global. Estes poluentes trazem um efeito nefasto para a saúde a longo prazo, sendo eles os principais causadores do efeito de estufa. Relativamente aos automóveis verifica-se alguma evolução da tecnologia relativamente à redução da emissão dos poluentes locais (como representado na Figura 9), no entanto a emissão dos poluentes globais (como o CO₂) não tem tido a mesma evolução decrescente, uma vez que são uma consequência do consumo de combustível, que tem tido uma tendência de aumento.

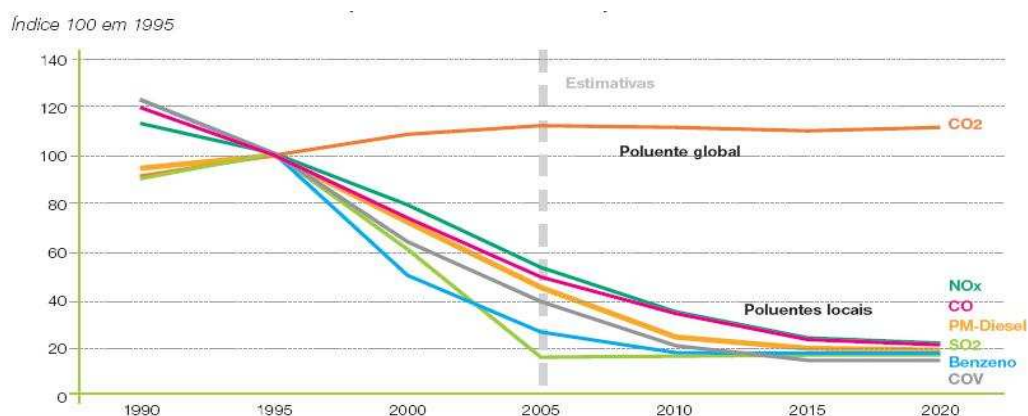


Figura 9 – Evolução das emissões nos transportes rodoviários Europeus [6].

Apesar da situação descrita na figura de cima se referir aos transportes rodoviários, é um facto perfeitamente aplicável à realidade nacional, uma vez que em Portugal o consumo nos transportes rodoviários corresponde a 90% do consumo total de energia no sector, valor que tem sido constante desde 2002 (Figura 10) [7]. Uma agravante é a taxa de motorização em Portugal que se tem aproximado a largo passo da média Europeia. Portugal que em 2002 possuía 376 veículos por 1000 habitantes, sendo que na mesma altura a média da EU era de 406 veículos por 1000 habitantes. Em 2006 Portugal apresentava um crescimento da taxa de motorização em 8%, superior ao crescimento médio da EU de 5%. Sendo assim no ano de 2006 a taxa de motorização de Portugal foi de 406 veículos por 1000 habitantes e a da média da UE na mesma altura 466 veículos por 1000 habitantes [8].

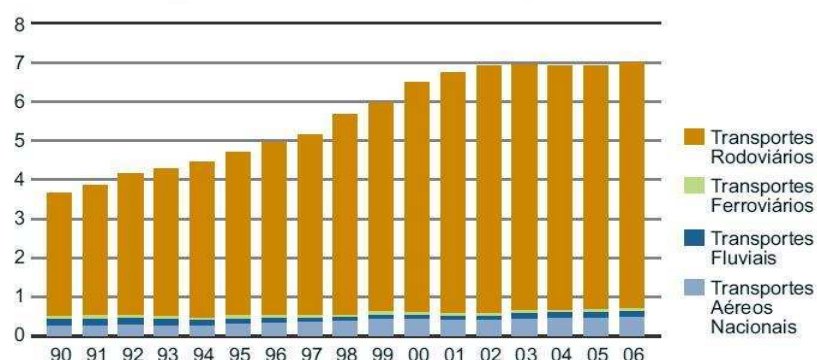


Figura 10 – Consumo de energia final por modo de transporte em Portugal (Mtep) [7].

A situação descrita na Figura 10 torna-se preocupante com a crise dos combustíveis fósseis. Verifica-se que em Portugal os transportes colectivos na última década têm perdido uma importante quota de mercado. Como agravante, os modos suaves (andar a pé e bicicleta) representam um tipo de mobilidade residual. Estes factos contribuem para uma deficiente eficiência energética e uma forte dependência dos combustíveis fósseis [7]. O sector dos transportes é assim um sector crucial, no qual devem ser tomadas medidas de estratégia de controlo ambiental e energético. Na figura seguinte é possível verificar que Portugal se encontra acima da média Europeia ao nível do consumo energético, emissões de dióxido de carbono e emissões de GEE no sector dos transportes.

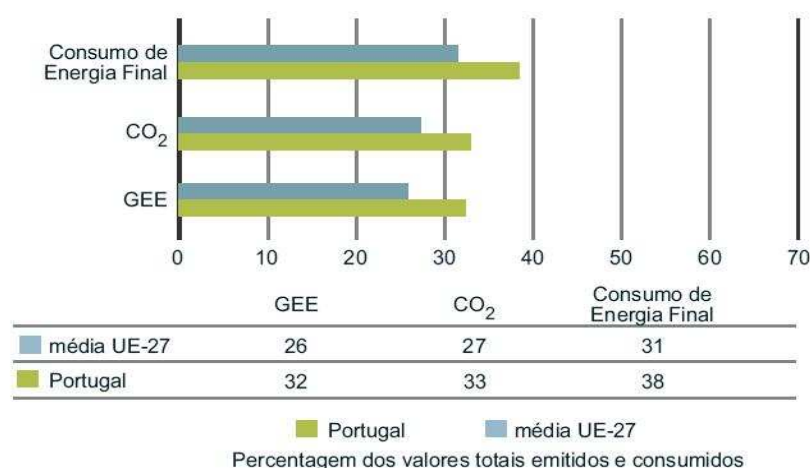


Figura 11 – Contribuição relativa do sector dos transportes para as emissões dos principais poluentes e para a quota de utilização de energia, em Portugal e na UE-27, 2006 [7].

Se não forem tomadas nenhuma medidas no sector dos transportes, segundo projecções, as emissões de gases de efeito de estufa em 2010 podem sofrer um aumento de 110% relativamente aos valores de 1990. A situação descrita pode ser observada na figura seguinte, onde se verifica que o sector dos transportes é de facto o que representa um maior aumento de emissões de GEE relativamente aos valores de emissões de 1990 [9].

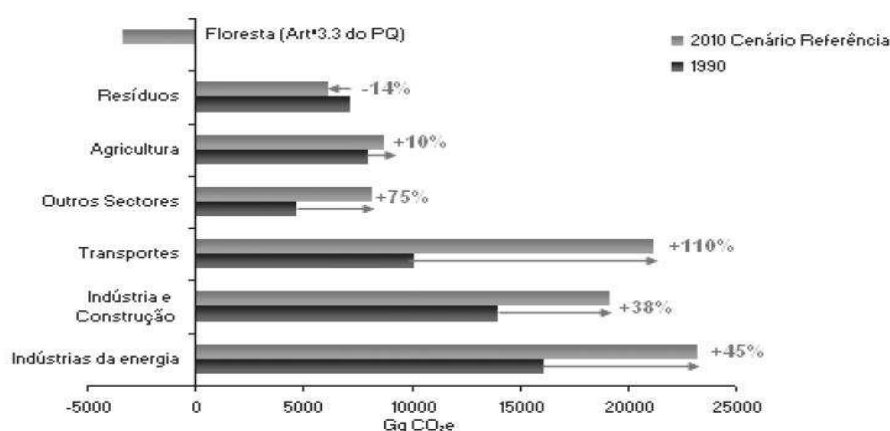


Figura 12 – Evolução das emissões de GEE (1990 / 2010), estimadas para o Cenário de Referência [9].

Surge no entanto a necessidade de utilização de uma nova energia que proporcione uma maior independência dos combustíveis fósseis e ao mesmo tempo seja mais amiga do ambiente torna-se óbvia.

O hidrogénio (H₂) apresenta-se como um vector energético, desta forma será necessária a sua produção através de uma matéria-prima. A sua produção implica o consumo de energia e emissões de poluentes, em maior ou menor quantidade dependendo da tecnologia de produção. No capítulo seguinte serão explicadas as características do H₂, bem como a sua produção, transporte e armazenamento.

Para que o H₂ se torne um combustível alternativo, terá que superar os combustíveis convencionais a nível ambiental, económico e de segurança. Contudo estes factores não chegam, a aprovação social é um factor muito importante. O combustível por mais seguro, económico e limpo que seja, se não for socialmente bem aceite, não vigora no mercado.

1.4. O Protocolo de Quioto

Como referido anteriormente a forte dependência dos combustíveis fósseis implica graves impactes ao nível das emissões de GEE. Contudo têm surgido medidas políticas de forma a reduzir esses impactes. A medida mais destacável foi o Protocolo de Quioto.

O Protocolo de Quioto visa um compromisso fixado à escala mundial, com excepção de alguns países como os Estados Unidos, de redução de gases de efeito de estufa. O Protocolo em questão fixa uma redução de GEE em pelo menos 5% entre 2008 e 2012 face aos valores do ano de referência que é 1990. No caso da UE a redução global de GEE seria de 8%. No entanto nem todos os países terão que diminuir as suas emissões de GEE. No caso dos países em vias de desenvolvimento não foi imposta qualquer restrição em termos de redução de emissões pelo Protocolo de Quioto [10].

Portugal poderia aumentar a sua emissão de GEE em 27% de forma a corresponder às exigências impostas pelo Protocolo de Quioto, ver Figura 13. Contudo em 2005 Portugal já apresentava emissões de GEE 40,4% superiores aos valores do ano de referência (1990), ultrapassando desta forma as exigências de Protocolo de Quioto [10].

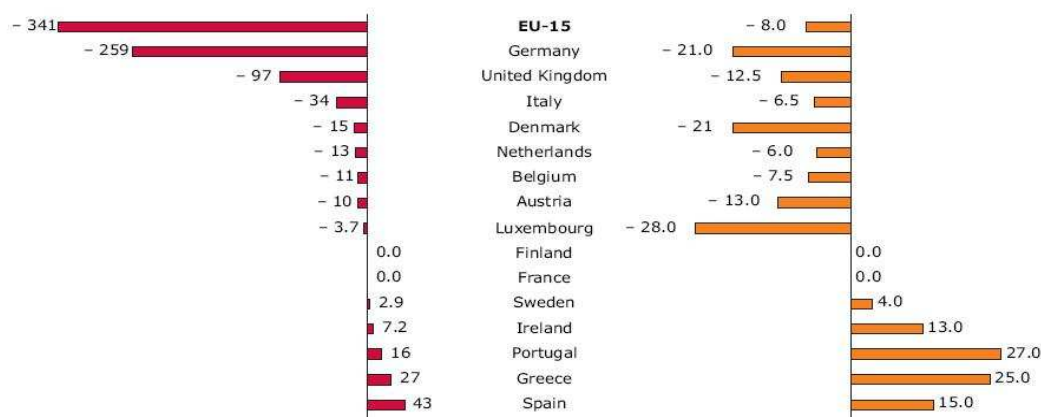


Figura 13 – Metas estipuladas pelo Protocolo de Quioto para os GEE [10].

Têm-se efectuado negociações de forma a se promulgar um novo protocolo que vigore após 2012, ou seja, após conclusão do Protocolo de Quioto. Um exemplo destas negociações foi a cimeira de Copenhaga (COP 15), efectuada em 2009. Contudo na cimeira COP15 não foi possível um acordo consensual entre os diferentes países envolvidos de forma a aprovar as metas pós 2012, ou seja, pós Protocolo de Quioto.

No entanto as metas de Quioto ainda não foram cumpridas, a UE, apesar de apresentar reduções globais nas emissões de GEE, estas não são suficientes para cumprir as imposições do protocolo [10].

As preocupações ambientais não só no sentido de cumprir o Protocolo de Quioto, mas também num sentido de desenvolvimento sustentável proporcionaram o desenvolvimento de métodos de análise de impactos ambientais. A Análise de Ciclo de Vida (ACV) é um dos métodos desenvolvidos para análise de impactes ambientais quer de um produto quer de um combustível. A ACV será descrita posteriormente no capítulo 3.

1.5. Objectivos

O principal objectivo da presente Dissertação de Mestrado consiste na ACV do hidrogénio com a ferramenta numérica Greenhouse gases, Regulated Emissions and Energy use in Transportation (GREET), desenvolvida pelo Argonne National Laboratory. Este software, que corre em formato Excel, possibilita a realização da ACV de combustíveis, contudo tem por base parâmetros e dados de entrada característicos da realidade Norte-Americana. Assim, efectuou-se uma actualização do modelo GREET de forma a contemplar a realidade nacional no que se refere ao ciclo de vida do H₂.

A base de dados desenvolvida ao longo da Dissertação contemplou as fases de produção, transporte, armazenamento e utilização do H₂ nos veículos rodoviários. A respectiva base de dados inclui todas as fases no processo de produção, ou seja, considerada todas as matérias-primas, os fertilizantes, a energia bem como as emissões inerentes no processo de ciclo de vida do H₂.

A presente Dissertação contemplou também a análise de um caso de estudo com a construção de cenários alternativos.

1.6. Estrutura da Dissertação

A presente Dissertação de Mestrado encontra-se dividida em 7 capítulos principais.

Numa fase inicial (Capítulo 1) é abordado o consumo energético mundial, demonstrando, de maneira geral, qual a região do globo com maior consumo energético. Nesta secção é dada maior ênfase ao petróleo, descrevendo-se a evolução do custo do barril de crude ao longo dos anos. Posteriormente é indicado o consumo energético em Portugal. Nesta parte é apresentada a contribuição de cada sector no consumo energético. De seguida é apresentado com maior detalhe o sector com maior consumo energético, ou seja, o sector dos transportes. Nesta fase para além do impacto ambiental proporcionado por este sector, é descrita qual a contribuição de cada modo de transporte

no consumo energético do sector. No seguimento da análise ambiental efectuada ao sector dos transportes, são apresentadas as metas estipuladas pelo protocolo de Quioto e da continuação das negociações de forma a encontrar novas metas pós Quioto. Por fim são apresentados os objectivos da presente dissertação.

No segundo capítulo são apresentadas as características do H₂. Inicialmente começa-se por descrever a actual situação do H₂ no sector dos transportes. Posteriormente, são apresentadas as propriedades do H₂, bem como as matérias-primas e os processos de produção, armazenamento e transporte. Seguidamente é relatada a situação do H₂ em Portugal. Por fim é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os estudos de ACV do H₂ já efectuados e os respectivos resultados obtidos.

O capítulo 3 é dedicado à descrição do processo de ACV, indicando os benefícios e as limitações desta análise.

No quarto capítulo é apresentada a metodologia da Dissertação. Inicialmente é descrito o plano de trabalho. De seguida são analisados os modelos de ACV GREET e GEMIS, apresentando de um modo geral o seu funcionamento. No presente capítulo também é apresentada uma breve descrição do modelo NETPAS. Por fim é apresentado o modelo desenvolvido ao longo da dissertação (MACV2H₂). Nesta fase é descrito todo o modelo bem como os pressupostos tomados em consideração.

O capítulo 5 é dedicado aos resultados e sua discussão. Numa fase inicial é apresentada a calibração do modelo com dados de veículos a H₂ já existente. Por fim são relatadas as análises WTP e WTW do H₂, comparando os resultados obtidos com os da gasolina.

O capítulo 6 é dedicado às conclusões obtidas no presente estudo. Neste ponto, são apresentadas ainda sugestões sobre possíveis trabalhos futuros.

No capítulo 7 são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas na elaboração desta Dissertação de Mestrado.

2. O Hidrogénio

No presente capítulo desta Dissertação serão abordados aspectos relativos ao H_2 . Neste capítulo será apresentado numa fase inicial o panorama do H_2 no sector dos transportes e numa fase posterior o panorama do H_2 em Portugal. No capítulo 2, serão também abordadas as propriedades do H_2 , bem como as matérias-primas necessárias para a sua produção. Posteriormente serão especificados os métodos de produção, armazenamento e transporte do H_2 como combustível.

2.1. O Hidrogénio no Sector dos Transportes

O H_2 tem sido apontado como o combustível do futuro para veículos eléctricos movidos a células de combustível (FCV), quer estes sejam ligeiros de passageiros, ligeiros de mercadorias ou mesmo autocarros [11].

No entanto as células de combustível a H_2 não são o único método de aplicação do H_2 no sector dos transportes. A utilização de H_2 em motores de combustão interna (ICE) é um facto e a aposta de alguns fabricantes, como é o caso da BMW, com o modelo BMW série 7 hydrogen [12].

Contudo os veículos movidos a células de combustível a H_2 apresentam vantagens relativamente aos veículos movidos a H_2 em motores de combustão interna ou mesmo relativamente a veículos movidos a células de combustível de outro combustível como por exemplo gasolina ou metanol [11].

Os veículos movidos com FC a H_2 apresentam uma eficiência superior relativamente aos veículos ICE. Um veículo ICE a H_2 permite um aumento de eficiência entre 20% a 25% relativamente a um veículo da combustão interna (ICE) a gasolina, em contrapartida uma célula de combustível possui uma eficiência teórica de 83%, sendo que 60% da energia do H_2 poderá ser convertida em electricidade e o restante numa produção combinada de electricidade e calor através da geração de energia térmica [13]. Para além deste factor um FCV contribui para uma redução da poluição sonora e da emissão de poluentes locais.

A utilização de H_2 no sector dos transportes encontra-se em fase de estudo, havendo já alguns veículos em circulação para teste.

Existem também, algumas iniciativas pioneiras que promovem a circulação de veículos a H_2 .

A Hychain (Hydrogen Challenge), é uma iniciativa Europeia, que promove a circulação de 158 veículos de baixa potência movidos a células de combustível a hidrogénio. Os veículos abrangidos são cadeiras de rodas, bicicletas, mini autocarros, scooters e

veículos utilitários, distribuídos por quatro países, sendo eles a Alemanha, a Espanha, a França e a Itália [14].

O CUTE (*Clean Urban Transport for Europe*) foi um projecto Europeu que se iniciou em 2001 e terminou em 2006 e teve com principal objectivo demonstrar a viabilidade do sistema de transportes movido a H_2 . O projecto envolveu 27 autocarros movidos a FC a H_2 e desenvolvidos pela Daimler. Estes 27 autocarros foram distribuídos em igual proporção por cada uma das nove cidades envolvidas no projecto. As cidades que desenvolveram infra-estruturas de abastecimento e de produção de H_2 de forma a acolherem o projecto CUTE foram: Amesterdão, Barcelona, Estocolmo, Estugarda, Hamburgo, Londres, Luxemburgo, Madrid e Porto [15, 16].

O ECTOS (*Ecological City TranspOrt System*), foi um projecto iniciado em 2000, com o objectivo de testar três autocarros Citaro movidos a FC a H_2 , sob factores socioeconómicos. Os autocarros circularam em Reykjavik, na Islândia. Este projecto teve poucas emissões de CO_2 , uma vez que a produção de H_2 foi efectuada por electrólise da água, recorrendo a fontes geotérmicas e a fontes de energia hídrica. O projecto em questão teve apoio financeiro da Comissão Europeia [15].

O STEP (*Sustainable Transport Energy Project*), é um projecto que decorreu de 2004 a 2006 e que visou a circulação de três autocarros Citaro em Perth, na Austrália Ocidental. Este projecto foi financiado pelo governo da Austrália Ocidental (proprietário dos três autocarros) e pelo governo Australiano. O principal objectivo do projecto foi determinar os aspectos críticos em termos técnicos, ambientais e socioeconómicos da implementação dos autocarros a células de combustível a H_2 [15]. Posteriormente houve uma extensão do projecto em um ano, ou seja, até 2007, devido a uma associação com o projecto Europeu HyFLEET CUTE [17].

O HyFLEET CUTE (*Hydrogen for Clean Urban Transport for Europe*), foi o projecto que sucedeu o CUTE. Este projecto apresenta a parceria de 31 empresas e tal como o seu antecessor contém o apoio financeiro da Comissão Europeia. O projecto que se iniciou em 2006 e findou em 2009, com o objectivo de reduzir o consumo de energia no sistema de transportes, recorrendo a veículos alimentados a H_2 com uma tecnologia mais eficiente e limpa. O HyFLEET CUTE envolveu 47 autocarros movidos a H_2 . Da totalidade dos autocarros 33 eram movidos a células de combustível a hidrogénio e 14 com ICE a H_2 e encontraram-se distribuídos por 10 cidades em 3 continentes. Os trinta e três autocarros movidos com FC a H_2 foram distribuídos por Amesterdão, Barcelona, Pequim, Hamburgo, Londres, Luxemburgo, Madrid, Perth e Reykjavik. Os 14 autocarros movidos com ICE a H_2 operaram em Berlim [15, 16].

Tal como quase todos os projectos referidos anteriormente, o ZERO REGIO foi também um projecto co-financiado pela Comissão Europeia e iniciou-se em 2004 com uma duração de cinco anos. O ZERO REGIO distingue-se dos anteriores uma vez que envolveu veículos ligeiros de passageiros distribuídos por duas zonas urbanas da UE,

sendo elas, Rhein-Main na Alemanha e Lombardia em Itália, mais propriamente Frankfurt (Alemanha) e Montava (Itália). A cidade de Frankfurt recebeu cinco FCV Daimler F-Cell, dos quais um com H₂ armazenado a 700bar e os restantes a 350bar. A cidade Italiana Montava recebeu três Fiat Panda com tecnologia FC a 350bar. O projecto visou desenvolver uma rede de transportes de ligeiros de passageiros a H₂ e demonstrar a sua viabilidade numa utilização diária [18].

2.2. Propriedades do Hidrogénio

O H₂ puro não possui cor, cheiro ou mesmo sabor, no entanto, não é possível adicionar ao hidrogénio os aditivos que se adicionam ao GN, pois estes possuem enxofre que danifica as células de combustível. Quando o H₂ é produzido por reformação de combustíveis fósseis este não se encontra no seu estado puro, pois possui azoto (N₂), CO₂, CO e outros gases. No entanto, como estes gases não possuem cheiro, cor e sabor, o H₂ também não vai possuir [19].

Em condições normais de pressão e temperatura (PTN) o H₂ encontra-se no estado gasoso. Para a pressão atmosférica, o hidrogénio é líquido (L.H₂) a uma temperatura abaixo do seu ponto de ebulição, -253°C, e é sólido a uma temperatura abaixo do seu ponto de fusão, -259°C. Ou seja, de todas as substâncias apenas o hélio tem ponto de fusão e ebulição mais baixo que o H₂ [19].

O H₂ não é tóxico. Contudo a sua facilidade de reacção com o O₂ do ar pode provocar asfixia. O H₂ ao reagir com o O₂ do ar vai reduzir a quantidade de disponível de O₂ a inalar, sendo que níveis de O₂ abaixo dos 19,5% já provocam inactividade humana [19].

Outra característica típica do H₂ é a sua massa atómica, uma vez que este tem menor massa atómica que qualquer outra substância. O facto de a sua massa atómica ser baixa leva a que a densidade do H₂ seja muito baixa quer este se encontre no estado gasoso ou líquido [19]. No Quadro 1 são apresentadas as densidades de alguns combustíveis, sendo a densidade uma medida de uma determinada quantidade de massa num dado volume a uma temperatura de referência.

Quadro 1 – Densidades de alguns combustíveis [19].

Combustível:	Densidade de Vapor [kg/m³] (@ 20°C e 1 atm)	Densidade de Líquido [kg/m³] (@ ponto de ebulição normal e 1 atm)
Hidrogénio	83,76*10 ⁻³	70,80
Metano	0,65	422,80
Gasolina	4,40	700,00

Em contrapartida verifica-se que o H₂ possui um volume específico elevado comparativamente com os restantes combustíveis. O volume específico corresponde à quantidade de volume por unidade de massa. No Quadro 2 encontra-se o volume específico dos combustíveis referidos no Quadro 1.

Quadro 2 – Volume específico de alguns combustíveis.

Combustível:	Volume específico de Vapor [m ³ / kg] (@ 20°C e 1 atm)	Volume específico de Líquido [m ³ /kg] (@ ponto de ebulição normal e 1 atm)
Hidrogénio	11,94	14,12*10 ⁻³
Metano	1,54	2,37*10 ⁻³
Gasolina	0,23	1,43*10 ⁻³

A razão de expansão é também uma propriedade importante. Esta corresponde à relação em volume ocupado por uma substância no estado gasoso e a mesma substância no estado líquido. No caso do H₂ a razão de expansão é de 1:845, ou seja, o hidrogénio gasoso (G.H₂) a 20°C e à pressão de uma atmosfera ocupa 845 vezes mais que o L.H₂ [19]. No quadro seguinte são apresentados os valores da razão de expansão de alguns combustíveis, sendo os valores das densidades utilizados para as condições de pressão e temperatura referidas no Quadro 1.

Quadro 3 – Razão de expansão de alguns combustíveis.

Combustível:	Razão de Expansão
Hidrogénio	1:845
Metano	1:650
Gasolina	1:159

O H₂ como combustível apresenta boas propriedades. Um quilograma de hidrogénio apresenta cerca de 2,8 vezes mais energia que a mesma quantidade de gasolina. A ausência dos pesados átomos de carbono da molécula de H₂, proporciona que este liberte mais energia por unidade de peso que outro combustível [20]. Este facto pode ser observado por análise do Poder calorífico superior (PCS) e do poder calorífico inferior (PCI) presentes no Quadro 4.

Quadro 4 – Poder calorífico superior e inferior dos combustíveis [20].

Combustível:	PCS (kJ/g) (@ 25°C e 1atm)	PCI (kJ/g) (@ 25°C e 1atm)
Hidrogénio	141,86	119,93
Metano	55,53	50,02
Propano	50,36	45,60
Gasolina	47,50	44,50
Gasóleo	44,80	42,50
Metanol	19,96	18,05

O facto de as moléculas de H₂ serem muito inferiores às das outras substâncias dificulta o seu armazenamento sem fugas. Mesmo em materiais herméticos ou impermeáveis há possibilidade de haver fugas de H₂.

Um derrame de L.H₂ é perigoso pois pode provocar um incêndio em contacto com o ar. Devido ao seu baixo ponto de ebulição (-253°C), um derrame de L.H₂ vai levar a uma rápida evaporação deste.

Contudo o facto de a molécula de H₂ ser tão pequena que proporciona as fugas, também aumenta a difusibilidade deste, no caso de uma fuga. Ou seja, uma fuga de L.H₂ vai levar à sua evaporação e a uma região de inflamabilidade que rapidamente se dispersa.

Em contrapartida os combustíveis convencionais, gasolina e gasóleo, em caso de derrame, espalham-se e evaporam-se lentamente proporcionando risco de um incêndio generalizado e persistente. Do mesmo modo o gás propano, como é mais denso que o ar, em caso de fuga vai-se alocar em locais mais baixos, factor que juntamente com a sua lenta difusibilidade pode provocar um incêndio prolongado ou mesmo uma explosão. O gás metano assemelha-se mais ao H_2 , na medida em que é mais leve que o ar, contudo este não se dispersa tão rapidamente como o H_2 [19].

Apesar de o índice de octanas não ser relevante para as pilhas de combustível, o H_2 possui índice de octanas acima de 100. O índice de octano corresponde à resistência dos combustíveis à detonação. O facto de o valor ser superior a 100, significa que os combustíveis têm mais resistência à auto-ignição. No caso do H_2 , este apresenta uma resistência 30% superior à do iso-octano, numa mistura pobre [19]. No Quadro 5 pode-se observar o índice de octano de alguns combustíveis.

Quadro 5 – Número de octanas de alguns combustíveis [19].

Combustível:	Número de Octano
Hidrogénio	+130
Metano	125
Propano	105
Gasolina	100
Gasóleo	87
Metanol	30

Uma propriedade importante de analisar é a inflamabilidade. O limite inferior de inflamabilidade (LII), representa a menor concentração de um determinado gás que possibilita a auto-propagação das chamas quando em contacto com o ar, ou seja, abaixo do LII a mistura ar-combustível é muito pobre, logo, não existe combustível suficiente para sustentar a combustão. O limite superior de inflamabilidade (LSI), representa a maior concentração de um determinado gás que irá possibilitar a auto-propagação das chamas quando em contacto com o ar. Uma concentração de combustível acima do LSI, não possibilita a combustão, pois não existe O_2 suficiente para proporcionar a combustão, ou seja, a mistura ar-combustível é muito rica. A diferença entre o LII e o LSI para o H_2 é muito grande, o que significa que até uma pequena fuga de H_2 pode provocar uma auto-combustão ou mesmo uma explosão à temperatura ambiente. Mesmo uma elevada concentração de H_2 pode provocar auto-combustão, pois o seu LSI à temperatura ambiente é 75% [19]. No quadro seguinte são apresentados os LII e LSI de alguns combustíveis à temperatura atmosférica. Adicionalmente, como os limites de inflamabilidade variam com a temperatura, as variações dos limites de inflamabilidade do H_2 com a temperatura são apresentadas na Figura 14.

Quadro 6 – Valores de LII e LSI de alguns combustíveis à temperatura atmosférica [19].

Combustível:	LII [%]	LSI [%]
Hidrogénio	4,0	75,0
Metano	5,3	15,0
Propano	2,2	9,6
Metanol	6,0	36,5
Gasolina	1,0	7,6
Gasóleo	0,6	5,5

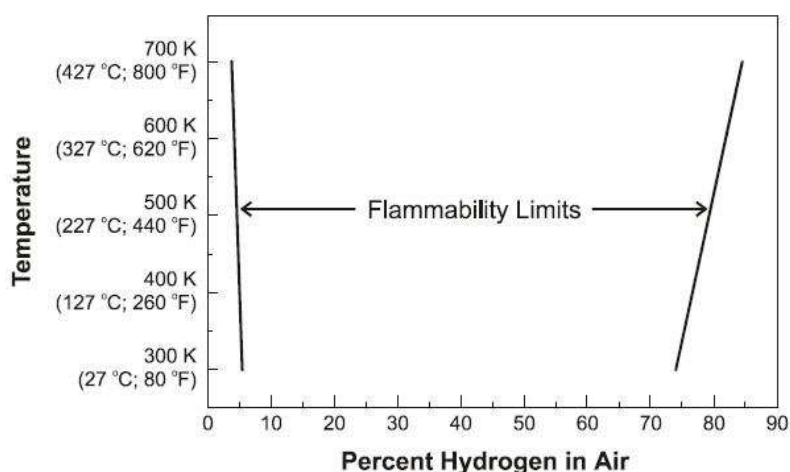


Figura 14 – Limites de inflamabilidade do hidrogénio com a variação da temperatura [19].

O ponto de inflamação é a menor temperatura à qual o combustível produz uma quantidade de vapores suficiente para formar uma mistura inflamável. O ponto de inflamação está directamente relacionado com a segurança. O H_2 como é um gás à temperatura atmosférica, significa que o seu ponto de inflamação é inferior à temperatura atmosférica, sendo este inferior a -253°C . Devido a este factor, deve-se ter especial atenção às condições de transporte do hidrogénio uma vez que à temperatura atmosférica ele é inflamável [19].

A temperatura de auto-ignição é a temperatura mínima necessária para que uma mistura de combustível seja auto-sustentável sem presença de uma fonte de ignição. No quadro seguinte são apresentadas as temperaturas de auto-ignição de alguns combustíveis. Verifica-se que a temperatura de auto-ignição do H_2 é elevada, facto que dificulta a ignição da mistura ar-combustível sem fonte de ignição adicional.

Quadro 7 – Temperatura de auto-ignição de alguns combustíveis [19].

Combustível:	Temperatura de auto-ignição [$^{\circ}\text{C}$]
Hidrogénio	585
Metano	540
Propano	490
Gasolina	385
Gasóleo	230 a 480
Metanol	30

2.3. Matérias-Primas

O H_2 é o elemento mais abundante do universo, no entanto este não existe na sua forma mais pura, podendo ser obtido por recurso a diversas matérias-primas.

O H_2 pode ser obtido por recurso às seguintes matérias-primas:

- Água;
- Biomassa;
- Carvão;
- Etanol;
- Hidrocarbonetos;
- Metanol

Na secção seguinte serão explicados os principais processos de produção de H_2 recorrendo a matérias-primas referidas.

2.4. Produção do Hidrogénio

Como referido anteriormente, o H_2 é um vector energético, logo será necessária a sua produção através de uma matéria-prima. Existem várias tecnologias que possibilitam a transformação de alguns combustíveis em H_2 emitindo mais ou menos poluentes para a atmosfera.

As tecnologias mais utilizadas para a conversão de um combustível em H_2 são a reformação a vapor (*steam reforming*), a oxidação parcial, a reformação autotérmica (*autothermal reforming*), a gaseificação, a electrólise, a fotólise e a biofotólise [21].

De seguida serão descritas as tecnologias mais comuns de produção de H_2 a partir de combustíveis fósseis.

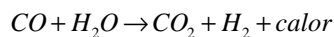
- Reformação a Vapor (*Steam Reforming*)

A reformação a vapor é um processo térmico que envolve a reacção de um hidrocarboneto leve (normalmente metano) com vapor de água. Este processo contém duas fases, em que numa primeira fase há uma reacção endotérmica com libertação de CO e H_2 . Na Equação 2, pode-se observar a equação geral da reacção endotérmica ocorrida no processo térmico de reformação a vapor, e na Equação 3 a mesma reacção mas aplicada particularmente ao CH_4 [21].



A reacção endotérmica ocorre a temperaturas entre os 700 e os 1000°C e a pressões que podem variar entre os 3 e os 25 bar [22].

Posteriormente, numa segunda fase, ocorre uma reacção exoenergética, designada por reacção de mudança (*shift reaction*). Nesta fase o CO produzido na primeira fase reage com vapor de água produzindo deste modo CO₂ e H₂, situação que pode ser observada na Equação 4 [21].



Equação 4

Esta fase ocorre em dois estágios, um primeiro estágio de mudança a alta temperatura (*high temperature shift – HTS*) e um segundo estágio de mudança de baixa temperatura (*low temperature shift – LTS*).

Na figura seguinte podem ser visionadas as fases de transformação do CH₄ em H₂ recorrendo à tecnologia de reformação a vapor.

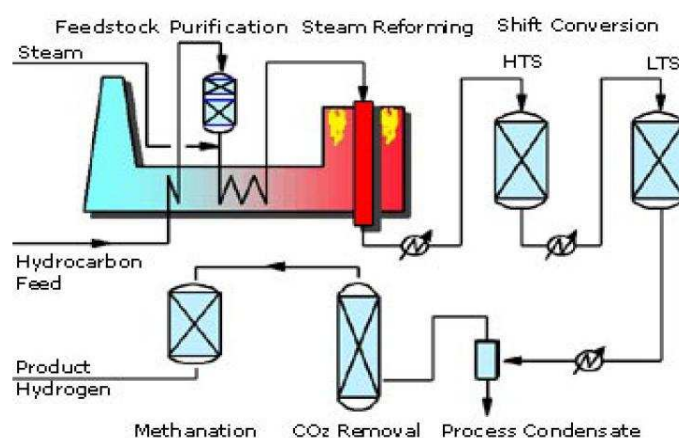
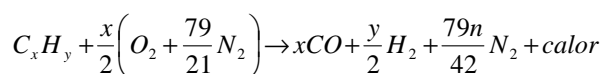


Figura 15 – Processo de conversão de metano em hidrogénio – reformação a vapor [23].

A conversão apresentada na Figura 15 corresponde à utilização de metano num processo de reformação a vapor de forma a obter H₂. O processo exemplificado na Figura 15 utiliza CH₄ como combustível utilizado para ser convertido em H₂, no entanto a mesma transformação é passível de ser obtida recorrendo a um outro hidrocarboneto leve como combustível a ser convertido.

- Oxidação Parcial

O processo de conversão por oxidação parcial consiste na produção de H₂, fazendo reagir um combustível com uma quantidade limitada de oxigénio. O combustível utilizado nesta tecnologia é um hidrocarboneto que ao reagir com o O₂ do ar vai gerar a reacção exotérmica apresentada na Equação 5 [24].



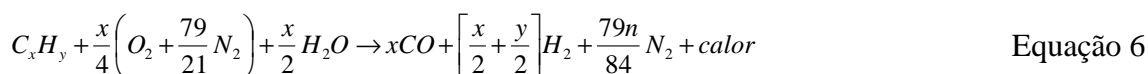
Equação 5

A reacção de conversão apresentada utiliza como combustível um hidrocarboneto que é posteriormente convertido em CO e em H₂ [21].

À semelhança da tecnologia apresentada anteriormente (*steam reforming*) pode-se efectuar uma reacção de mudança, convertendo deste modo o CO em H₂ e em CO₂, ver Equação 4. A utilização da reacção de mudança reduz as emissões locais, em contrapartida a emissão de gases do efeito de estufa aumenta.

- Reformação Autotérmica (*Autothermal Reforming*)

Este processo resulta numa combinação dos anteriores. Na reformação autotérmica ocorre uma reacção exotérmica, um hidrocarboneto reage com O₂ e com vapor de água obtendo-se desta forma H₂ e CO [21]. Esta reacção é também designada como oxidação parcial com injeção de vapor de água [24]. Na Equação 6 pode ser observada a reacção descrita tendo como combustível um hidrocarboneto.



O CO presente nos reagentes, tal como nos processos de conversão referidos anteriormente, pode sofrer uma reacção de mudança, ver Equação 4, obtendo-se assim CO₂ e H₂ [21]. Este processo permite obter uma maior quantidade de H₂ nos produtos que os processos anteriores [24]. No entanto a necessidade de purificar os gases à saída proporciona não só um aumento do custo do custo final do H₂ como uma diminuição da eficiência [21].

- Gaseificação

A gaseificação pode ser utilizada com combustíveis fósseis tal como o carvão e com fontes renováveis tal como a biomassa, situação descrita posteriormente. A reacção de conversão do carvão vem expressa na Equação 7 [21].



O carbono presente no carvão é convertido em CO e em H₂. Esta conversão gera algumas quantidades de fenóis e alcatrão.

Neste processo o CO também pode ser convertido em CO₂ e H₂ recorrendo à reacção de mudança, ver Equação 4.

A produção de H₂ recorrendo a esta tecnologia com carvão como combustível proporciona um custo mais elevado do produto final do que recorrendo ao gás natural, devido à superior complexidade do sistema.

De seguida serão apresentadas os processos para conversão da biomassa de forma a obter H₂.

- Pirólise

A pirólise consiste no aquecimento da biomassa com a ausência de ar, a uma temperatura entre os 377°C e os 527°C e a uma pressão entre 1bar e 5bar, de forma a

converter a biomassa em componentes gasosos, óleos líquidos e carvão vegetal sólido [25]. Existem dois tipos de pirólise, a pirólise lenta e a pirólise rápida. No entanto, para produção de H₂ apenas é usada a pirólise rápida uma vez que na pirólise lenta da biomassa os produtos são essencialmente carvão.

A reacção de pirólise da biomassa com ausência de ar é descrita pela Equação 8 [25].



Contudo os produtos gasosos da reacção podem sofrer transformação de forma a originar H₂. O caso do CH₄, que submetido a uma reformação a vapor vai originar H₂ e CO, como descrito em cima, ver Equação 3. O CO obtido como produto da pirólise e da reformação a vapor do metano pode ser submetido a uma reacção de mudança produzindo desta forma H₂ e CO₂, Equação 4.

Os produtos líquidos da pirólise da biomassa, ou seja, os óleos, também podem sofrer transformação de forma a aumentar significativamente a produção de H₂ a partir da biomassa. A fracção de óleo solúvel em água pode ser usada para produção de H₂ [25].

- Gaseificação

Tal como foi referido anteriormente a biomassa pode ser submetida a gaseificação obtendo-se H₂ como produto da reacção. A gaseificação da biomassa ocorre a temperaturas superiores a 1000°C, sendo que numa primeira etapa a biomassa sofre uma decomposição termoquímica formando-se gases, carvão vegetal e hidrocarbonetos, ver Equação 9 [25, 26]. O carvão vegetal e os hidrocarbonetos reagem com o CO, o CO₂, o H₂ e a água produzindo produtos gasosos, Equação 10 à Equação 12 [26]. Ocorrem também reacções de reformação a vapor (ver Equação 3) e a reacção de mudança (Equação 4).



Existem algumas diferenças significativas entre a gaseificação da biomassa e a pirólise da biomassa. Para além de a gaseificação da biomassa ser efectuada na presença de O₂, ao contrário da pirólise, esta tem como objectivo a produção de produtos gasosos sendo que na pirólise o principal objectivo é a produção de carvão vegetal e óleos [25].

A água é outra matéria-prima, a partir da qual é possível obter H₂, com mais ou menos emissões de poluentes, dependendo da fonte primária utilizada na separação da água [27]. O processo utilizado para a produção de H₂ utilizando água como matéria-prima é a electrólise.

- Electrólise

Esta tecnologia possibilita a produção de H_2 e O_2 , no entanto, a produção de H_2 recorrendo à água como matéria-prima, é apenas 4% da produção mundial deste [28]. A electrólise permite a produção de H_2 de alta pureza, contudo as aplicações mais comuns são de pequena escala, uma vez que a produção de H_2 em larga escala não é possível economicamente. A produção de H_2 sob esta tecnologia têm-se cingido a alguns nichos do mercado, tais como, aplicações médicas, naves especiais, indústria electrónica e alimentar [28].

A electrólise consiste no fornecimento de energia eléctrica à água de forma a separar os seus componentes (H_2 e O_2), ver Equação 13 [21].



A energia eléctrica pode ser produzida por combustíveis fósseis, recorrendo à energia hídrica, eólica, fotovoltaica ou mesmo através da biomassa. O processo de electrólise possui mais ou menos emissões dependendo da fonte de energia de produção da energia eléctrica.

Existem várias tecnologias possíveis para a realização da electrólise da água, das quais de destacam a electrólise alcalina, a electrólise de polímero de membrana electrolítica (PEM) e a electrólise de alta temperatura [21].

O processo de electrólise alcalina pode ser visionado na Figura 16.

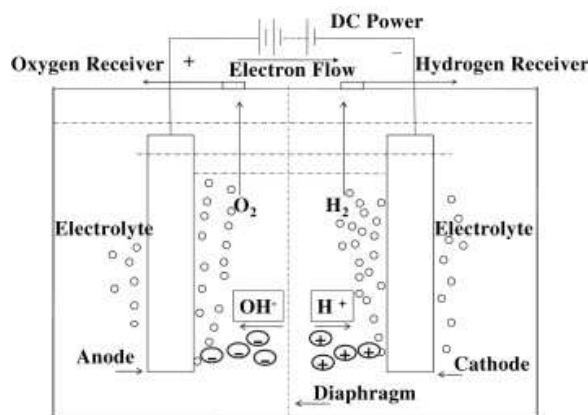


Figura 16 – Processo de electrólise alcalina [28].

Este tipo de tecnologia é adequado para aplicações fixas com pressões de operação máximas de 25 bar [21]. Como pode ser observado na Figura 16, esta tecnologia é constituída por um electrolito, um cátodo, um ânodo e uma fonte de corrente contínua [28]. No interior da célula electrolítica ocorre uma reacção que permite a separação da água em iões hidrogénio (H^+) e em iões hidróxido (OH^-), ver Equação 14 [21]. Verifica-se a formação de OH^- em vez de OH , uma vez que o OH é instável necessitando de um electrão para preencher a sua camada de valência. Desta forma o OH vai captar um electrão ao H_2 de forma a preencher a sua camada L_p com seis electrões, ou seja, de forma a ficar com todas as orbitais preenchidas formando-se assim OH^- e H^+ .



Deste modo os electrões que fluem no terminal negativo (cátodo) vão ser captados pelos H^+ , formando-se junto ao cátodo H_2 , ver Equação 15 [21].



Os OH^- vão-se deslocar através da solução electrolítica até ao ânodo, ao qual vão doar os electrões formando O_2 , ver Equação 16 [21]. A reacção final é expressa pela Equação 13 [21].



A utilização de diafragma (ver Figura 16) tem a finalidade de se poder captar os gases H_2 e O_2 , estando os receptores destes gases distante do cátodo e do ânodo. Ou seja, o diafragma impede a mistura dos gases H_2 e O_2 até que cheguem aos receptores estando estes afastados do cátodo e do ânodo [28].

O esquema de funcionamento da electrólise PEM pode ser observado na Figura 17.

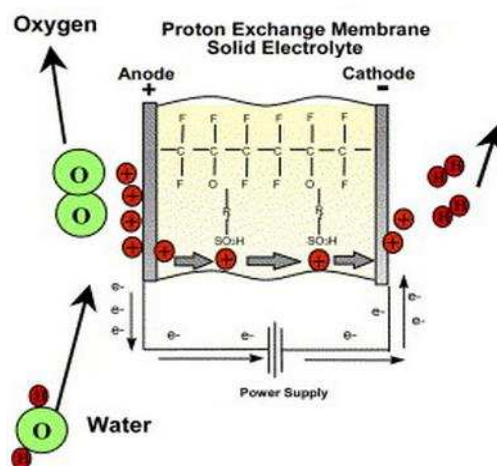


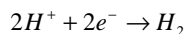
Figura 17 – Electrólise de polímero de membrana electrolítica [29].

Contrariamente à electrólise alcalina, a electrólise PEM pode ser implementada em aplicações móveis ou fixas com pressões operacionais até 100 bar. A grande diferença reside no facto desta tecnologia não necessitar de electrolito líquido, simplificando desta forma o projecto [21]. O electrolito nesta tecnologia é composto por uma membrana de polímero de ácido. Contudo o tempo de vida da membrana torna uma desvantagem desta tecnologia face à electrólise alcalina [21].

A água é dividida devido a uma corrente contínua em O_2 , H^+ (prótons) e em electrões junto ao ânodo [29]. Este processo é descrito pela Equação 17.



Os H^+ vão passar através da membrana de electrólito polimérico até chegarem ao cátodo. Junto ao cátodo os H^+ vão captar os electrões formando desta forma H_2 [27]. A reacção junto ao cátodo é descrita pela Equação 18 [21]. Tal como na electrólise alcalina reacção final é expressa pela Equação 13 [21].



Equação 18

A energia necessária para separar água a 1000°C é inferior à energia necessária para efectuar a electrólise a 100°C . Desta forma a electrólise a alta temperatura pode operar com uma eficiência global superior à electrólise a baixa temperatura [21]. A Figura 18, demonstra um esquema de funcionamento da electrólise de alta temperatura.

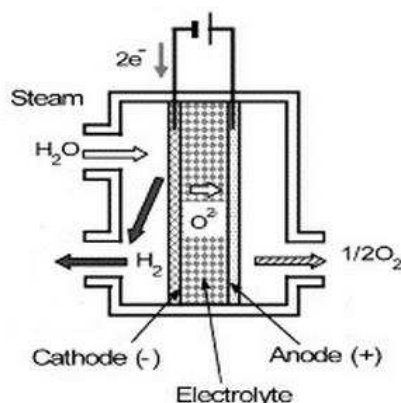
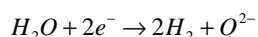


Figura 18 – Electrólise de alta temperatura [30].

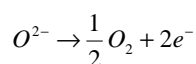
A célula electrolítica de alta temperatura é composta pelo electrólito, pelo eléctrodo de H_2 (cátodo), o eléctrodo de O_2 (ânodo) e uma fonte corrente [31].

O vapor de água fornecido ao cátodo da célula electrolítica de alta temperatura é aquecido no exterior. O vapor de água ao chegar ao cátodo é dissociado em H_2 e iões oxigénio (O^{2-}), ver Equação 19 [32].



Equação 19

O H_2 é assim recolhido e os O^{2-} vão-se deslocar através do electrólito, que é condutor de O^{2-} , até ao ânodo. No ânodo vai ocorrer a reacção expressa na Equação 20, onde é recolhido o O_2 como produto da reacção [32]. A reacção final é expressa pela Equação 13 [21].



Equação 20

- Fotoelectroquímico (Fotólise)

A fotólise da água é um processo no qual é utilizada a luz solar para decompor a água nos seus componentes, H_2 e O_2 [21].

Na Figura 19, é apresentada uma representação esquemática da fotólise da água.

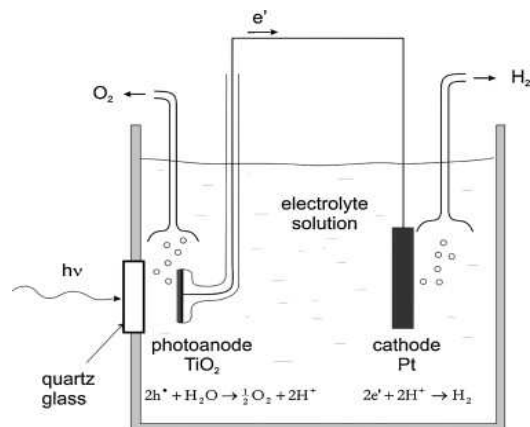


Figura 19 – Esquematização da fotólise da água [33].

O ânodo ao absorver a luz solar vai proporcionar uma ionização intrínseca ao semiconductor, ver Equação 21. Deste modo junto ao ânodo ocorre a reacção expressa pela Equação 22, onde há libertação de O_2 e H^+ (protões) [33].



Os electrões são então transportados pelo semiconductor até ao cátodo. Os H^+ deslocam-se na solução electrolítica até ao cátodo onde são reduzidos ocorrendo a reacção expressa na Equação 18 [33].

- Fotobiológico (Biofotólise)

O processo de produção de H_2 biologicamente ainda se encontra em escala de laboratório, apesar de já ter sido observado há cerca de um século. A biofotólise pode ser classificada em biofotólise directa e biofotólise indirecta [25].

Na biofotólise directa as algas verdes e as cianobactérias em condições anaeróbias proporcionam a conversão da água em H_2 e O_2 . A biofotólise directa é composta por dois fotosistemas que operam em série, o fotossistema I (PSI) e o fotossistema II (PSII). A absorção da energia solar por parte do PSII gera um oxidante forte que proporciona a libertação de electrões da água. A energia solar absorvida pelo PSI permite que os electrões libertados no PSII cheguem à ferredoxina (fd). Posteriormente a hidrogenase aceita os electrões da ferredoxina produzindo H_2 . A reacção geral de biofotólise encontra-se descrita na Equação 23 [34].



A Figura 20 representa esquematicamente a biofotólise directa.

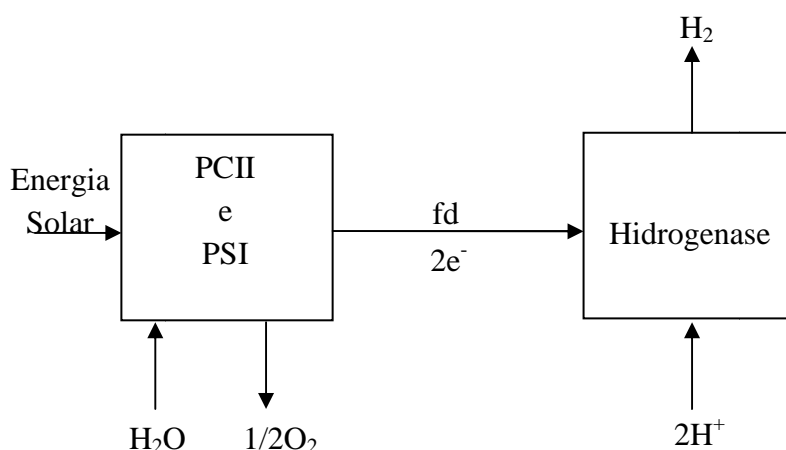
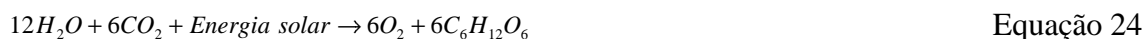


Figura 20 – Esquema da biofotólise directa.

Na situação da biofotólise indirecta a cianobactéria proporciona a conversão da água em H_2 e O_2 mas de forma indirecta. Este processo envolve a produção de H_2 e de O_2 em fases distintas. As cianobactérias utilizam a energia solar como fonte energética e o CO_2 existente no ar como fonte de carbono produzindo assim substâncias celulares. Estas substâncias celulares são posteriormente utilizadas para a produção de H_2 . A reacção que descreve a formação de substâncias celulares é apresentada na Equação 24, e a reacção que representa a formação de H_2 é apresentada na Equação 25 [34].



Na Figura 21, encontra-se representado esquematicamente o processo de biofotólise indirecta.

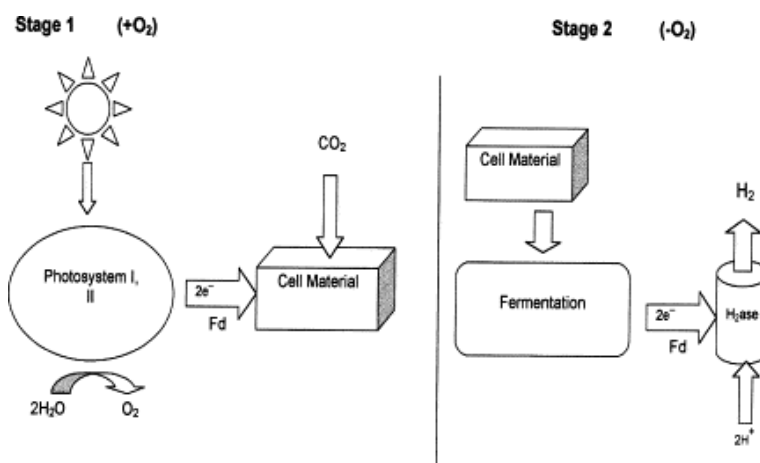


Figura 21 – Representação esquemática do processo de biofotólise indirecta [35].

- Captura e armazenamento do dióxido de carbono

Esta tecnologia tem uma grande importância na produção de H_2 por recurso a combustíveis fósseis, uma vez que a produção de H_2 com combustíveis fósseis provoca grandes emissões de CO_2 e a tecnologia em questão consiste no sequestro e posterior

armazenamento do dióxido CO_2 . Na gíria a captura e armazenamento do CO_2 (*Capture and storage of CO_2 – CCS*) é designada por descarbonização e num processo de combustão a CCS pode ser efectuada de três formas distintas, a pré-combustão, a pós-combustão e a oxi-combustão [21].

No processo de pré-combustão o CO_2 é separado do combustível, antes de este ser queimado. Este processo com centrais de ciclo combinado de gaseificação integrada (IGCC), usa a tecnologia de gaseificação para transformar o combustível num gás síntese, que é posteriormente usado num ciclo combinado de produção de energia. Este processo para além de necessitar de pouca água e ter pouca produção de resíduos sólidos, permite uma captura de até 90% de CO_2 do gás síntese [36]. O CO_2 é posteriormente comprimido como se pode observar na representação esquemática da Figura 22.

O processo de pós-combustão consiste na remoção do CO_2 na combustão ou nos gases resultantes da combustão. Após a queima do combustível, os gases resultantes vão ser refinados, e por recurso a uma solução química absorvente, o CO_2 é absorvido por esta. Normalmente a solução química utilizada é MEA (*Metiletanolamina*). A solução absorvente permite uma absorção até 85% do CO_2 dos gases, sendo o restante libertado para a atmosfera juntamente com os restantes gases de escape. O CO_2 absorvido é posteriormente comprimido, de forma a ser transportado para se armazenar [37]. Na Figura 22 encontra-se uma representação esquemática deste processo.

O processo de oxi-combustão, não é mais que um processo de pós-combustão, no entanto em vez de ar, envolve a utilização de O_2 puro. A utilização de O_2 puro na combustão do combustível fóssil, vai gerar nos gases essencialmente CO_2 e vapor de água. O CO_2 dos gases é facilmente separado condensando o vapor de água presente nestes. Por fim o CO_2 recolhido é comprimido de forma a ser transportado e armazenado [21, 37].

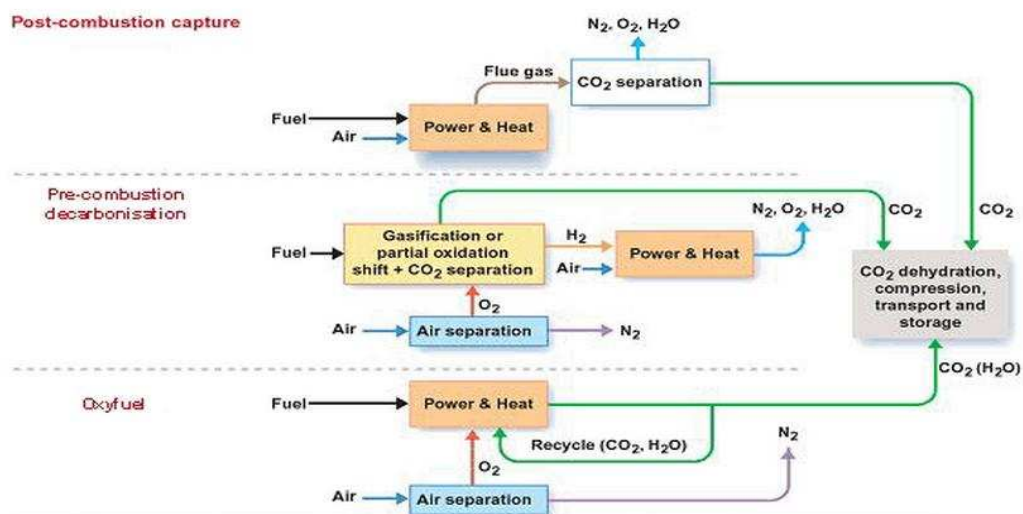


Figura 22 – Processos de captura de dióxido de carbono [38].

O modo de transporte do CO₂ depende não só do local de instalação do centro de captura de CO₂ mas também do local onde este vai ser armazenado. O CO₂ pode desta forma ser transportado em gasodutos, navios ou em combinados [21].

O armazenamento do CO₂ pode ser efectuado sob a sua forma gasosa em rochas porosas profundas que contêm água extremamente salgada, sob a sua forma líquida no fundo do oceano ou mesmo sob a forma sólida fazendo-o reagir com óxidos metálicos produzindo carbonatos estáveis ou carvão sólido [38]. O CO₂ pode também ser armazenado nos locais onde se encontram as reservas de combustíveis fósseis (Petróleo e GN), tal como representado na Figura 23.

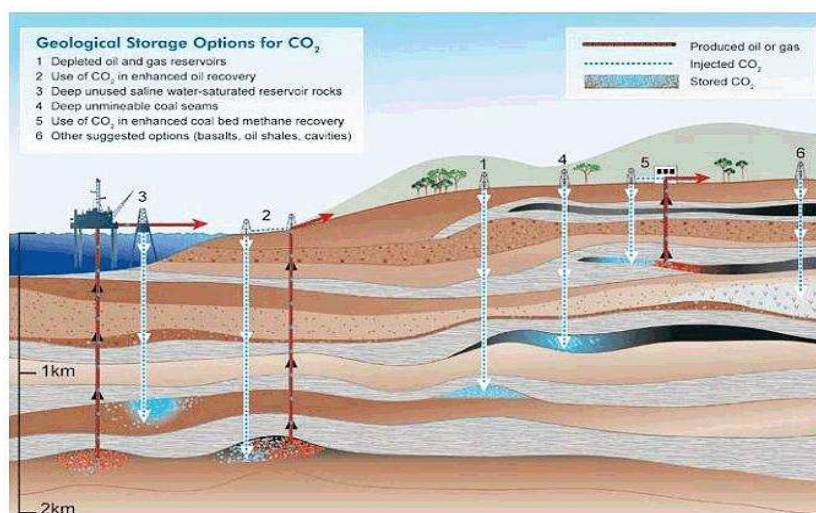


Figura 23 – Armazenamento do dióxido de carbono [38].

- Produção centralizada de Hidrogénio

A produção centralizada de H₂ é uma produção em larga escala. A produção de H₂ sob forma centralizada é considerada uma produção industrial, onde os custos do H₂ se tornam mais baixos relativamente à produção descentralizada ou distribuída [21]. Na figura seguinte pode-se observar uma esquematização da produção centralizada de H₂ com o sistema de captura e armazenamento de CO₂.

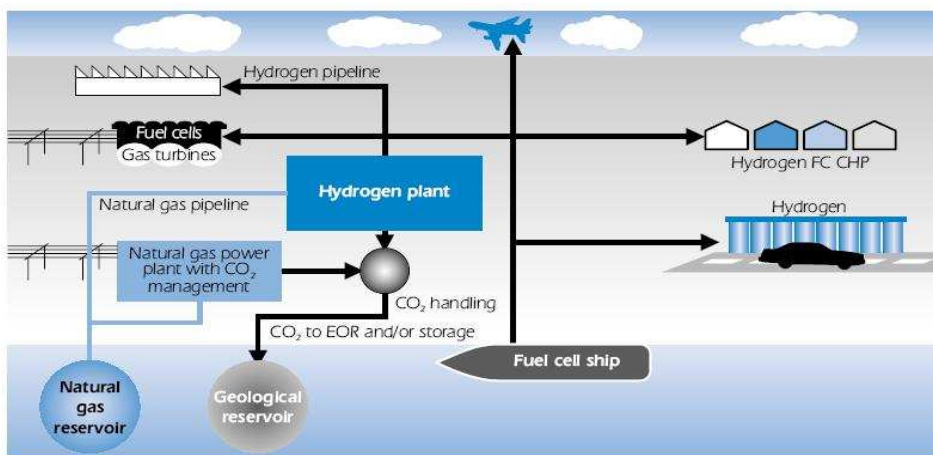


Figura 24 – Esquematização da produção centralizada de H₂ com captura e armazenamento de CO₂ [21].

Neste caso o H_2 é produzido em larga escala num local e depois transportado para as estações de reabastecimento e locais de consumo.

- Produção distribuída de Hidrogénio

A produção distribuída de H_2 também pode ser designada como produção descentralizada, ou mesmo produção em estações de reabastecimento tem como principal vantagem relativamente à produção centralizada a redução de necessidade de transporte do H_2 , uma vez que este é produzido nas estações de reabastecimento. No entanto a produção de H_2 nas estações de reabastecimento, para além de possuírem pequena capacidade, proporcionam um elevado custo de aquisição do H_2 . Outra desvantagem face à produção centralizada é o facto de a CCS ser dificilmente aplicada na produção de H_2 [21].

2.5. Armazenamento do Hidrogénio

O armazenamento do H_2 pode ser efectuado sob forma gasosa, líquida ou sólida. No caso dos transportes prendem-se algumas questões importantes como o espaço disponível e a segurança, que ditam a escolha do tipo de armazenamento do H_2 .

- Hidrogénio Gasoso

O $G.H_2$ pode ser armazenado em botijas ou em tanques normalmente de aço, contudo o reduzido peso dos materiais compósitos torna-os objectos de estudo para de forma a constituírem os tanques de armazenamento.

Contudo o $G.H_2$ ocupa muito espaço, ou seja, é necessário um grande volume para armazenar uma pequena massa de $G.H_2$. Deste modo o transporte de H_2 em botijas é ideal para utilizações onde a questão do espaço não é problema. O problema da densidade do $G.H_2$ pode ser minimizado com o aumento da pressão. Contudo os custos e o dispêndio de energia são muito superiores [21].

Alguns protótipos FCV a H_2 em circulação possuem tanques de $G.H_2$. O custo do armazenamento de H_2 a alta pressão é ditado em grande parte pelo custo da fibra de carbono, que é essencial para formar um reservatório com resistência estrutural e leve. Têm-se efectuado estudos sobre duas temáticas de forma a melhorar o desempenho do armazenamento de H_2 comprimido. Uma das abordagens prende-se com o facto da temperatura do H_2 . Uma diminuição de temperatura permite um aumento da densidade. Desta forma têm-se efectuado estudos de forma a armazenar H_2 sob forma criogénia, aumentando assim a capacidade volumétrica de armazenamento. O desenvolvimento de reservatório de H_2 seguros e que permitam retirar proveito do máximo espaço disponível do veículo, também tem sido alvo de estudo [39].

As micro-esferas permitem também armazenar $G.H_2$. Esta tecnologia encontra-se em desenvolvimento e permite armazenar $G.H_2$ a altas pressões. O $G.H_2$ pode ser armazenado no interior das esferas de vidro, pois estas ao serem aquecidas, o $G.H_2$ passa

pelas suas paredes. As esferas estando expostas à temperatura ambiente, o H_2 pode ser armazenado no seu interior com perdas muito lentas de H_2 . Contudo para libertação do H_2 presente no interior das esferas será necessário submete-las a uma temperatura por volta dos 300°C , sendo este um problema operacional na aplicação em veículos pois temperatura necessária a fornecer é superior à disponível a partir da célula de combustível. O armazenamento de $G.H_2$ no interior das esferas de vidro apresenta mais alguns problemas, como a baixa densidade volumétrica das esferas e a necessidade de uma pressão muito elevada para o seu enchimento. Em contrapartida a estas desvantagens, as micro-esferas são claramente seguras no armazenamento do H_2 para utilização em veículos, permitindo retirar o máximo proveito do espaço disponível num veículo, diminuindo assim o custo do reservatório de armazenamento. A investigação no sentido de reduzir a temperatura de libertação do H_2 para 100°C , pode tornar esta tecnologia muito promissora para armazenar $G.H_2$ [21].

- Hidrogénio Líquido

A densidade energética do H_2 pode ser melhorada com o armazenamento de H_2 no estado líquido. No entanto a energia necessária para liquefacção do H_2 , o volume, o peso e o custo do tanque são os grandes problemas da utilização desta tecnologia para armazenamento de H_2 . Existem várias formas de armazenar $L.H_2$, desde o armazenamento a temperaturas criogénicas (-253°C), à utilização em soluções de $NaBH_4$ ou mesmo em líquidos orgânicos recarregáveis.

O armazenamento de $L.H_2$ sob forma criogénica implica grande consumo de energia, e proporciona perdas de 30% a 40% da energia contida no H_2 . No entanto como referido anteriormente, desta forma consegue-se armazenar mais H_2 num dado volume do que se este se encontra-se no estado gasoso. O armazenamento de $L.H_2$ também se torna menos perigoso que o armazenamento de $G.H_2$, uma vez que uma fuga de $L.H_2$ implica primeiro a sua evaporação, permitindo que o gás se distribua mais facilmente pela atmosfera.

O armazenamento de $L.H_2$ em soluções de borohidreto ($NaBH_4$) é possível, ocorrendo a reacção catalítica representada pela Equação 26, sendo que a esta apresenta uma reacção ideal [21].



Esta tecnologia permite a geração de H_2 a bordo de um veículo de forma segura. No entanto o produto da reacção ($NaBO_2$) não pode ser regenerado em ($NaBH_4$) a bordo do veículo. Devido a este factor o uso desta tecnologia em veículos torna-se bastante caro [21].

Alguns líquidos orgânicos também permitem armazenar $L.H_2$. Um exemplo de um líquido orgânico recarregável é a desidrogenação e hidrogenação do metilciclohexano (C_7H_{14}) e do tolueno (C_7H_8), ver Equação 27, apresentada como reacção ideal [21].



Esta tecnologia deve conter elevadas normas de segurança, uma vez que o metilciclohexano reage facilmente com oxidante provocando incêndios e explosões [21].

- Hidrogénio Sólido

O armazenamento de H_2 em materiais sólidos é uma tecnologia promissora que se apresenta como sendo segura e eficiente para o armazenamento de energia. Existem quatro principais grupos de materiais, o carbono e outros materiais de elevada área superficial, os hidretos químicos reactivos em H_2O , os hidretos químicos térmicos e os hidretos recarregáveis [21]. Uma técnica emergente e que tem sido alvo de estudo é o armazenamento de H_2 por adsorção em nanotubos de carbono [40].

2.6. Transporte do Hidrogénio

Como foi referido anteriormente, o H_2 pode ser produzido de forma centralizada ou numa estação de reabastecimento.

O facto de o H_2 ser produzido na estação de reabastecimento reduz os problemas de transporte, no entanto os custos de produção de H_2 nos locais onde este é necessário são superiores aos custos de produção de H_2 centralizado. Contudo uma produção em grandes quantidades de H_2 , ou seja, uma produção centralizada, implica o posterior transporte do H_2 até às estações de reabastecimento.

O H_2 pode assim ser transportado até às estações de reabastecimento em gasodutos ou por estrada recorrendo a reboques tubulares e a tanques criogénicos de $L.H_2$.

A utilização de gasodutos, é a forma de transportar grandes volumes de H_2 com menores custos [41]. Uma filial italiana do grupo Air Liquide, a Air Liquide Itália, em cooperação com o projecto HyChain opera com uma rede de gasodutos para transporte de H_2 com 600 km. A filial Alemã do mesmo grupo, a Air Liquide Deutschland GmbH, também em cooperação com o projecto HyChain, explora cerca de 240 km de gasodutos de H_2 [42]. Os Estados Unidos em 2006 apresentavam cerca de 700 km de gasodutos a H_2 . Apesar destas iniciativas, as infra-estruturas de gasodutos a H_2 é muito pequena quando comparada com os gasodutos a GN [41].

O transporte de H_2 comprimido em estrada, em reboques tubulares, é efectuado para curtas distância, uma vez que este tipo de distribuição do H_2 torna-se muito caro [41].

Como a disponibilidade de gasodutos ainda é muito limitada, o transporte de H_2 a longas distâncias é efectuado como liquido criogénico. Apesar de ser necessária muita energia para a liquefacção do H_2 , como a densidade do $L.H_2$ é superior, este para um dado volume possui um maior teor de energia. Após o transporte até a estação de reabastecimento, o H_2 é transformado em gás no local para consumo [41].

2.7. O Hidrogénio em Portugal

Em 2003 foi criada uma associação entre empresas do sector energético e automóvel conjuntamente com institutos de investigação e desenvolvimento. A Associação Portuguesa para a Promoção do Hidrogénio (AP2H2) foi fundada não só com o intuito de divulgar, através de seminários, informação relativa ao H₂, mas também como forma de promover o desenvolvimento do H₂ sob investigação científica em Portugal ou em cooperação com outros países. A associação pretende no entanto contribuir para a criação e implementação de legislação relativa ao H₂ [43].

Existem no entanto algumas iniciativas no sentido de promover o H₂, algumas já realizadas, outras encontram-se ou em estudo ou a decorrer.

Como referido anteriormente (Capítulo 2.1), o projecto CUTE financiado pela UE, iniciou-se em 2001 e terminou em 2006 [15]. O projecto CUTE teve como principal objectivo desenvolver e demonstrar um sistema de transportes com emissões locais muito reduzidas e baixo nível de ruído. A infra-estrutura energética, quer de produção quer do local de reabastecimento também foi alvo deste projecto. Uma das cidades abrangida pelo projecto foi a cidade do Porto, onde circularam autocarros urbanos movidos a H₂. Os veículos Mercedes Citaro do fabricante DaimlerChrysler, circularam numa linha da Sociedade de Transportes Colectivos do Porto (STCP), num percurso completamente urbano de 7,8 km com inclinações acentuadas (superiores a 10%) [44]. As características da via proporcionaram a que o veículo a H₂ apresenta-se uma velocidade média muito baixa (8,9 km/h), facto que agrava o consumo de combustível [45]. A BP foi a responsável pela infra-estrutura e pelo abastecimento do H₂ para os autocarros da STCP. O H₂ produzido por reformação a vapor do GN, numa escala de produção de pequenas quantidades, era transportado por camião na forma gasosa e posteriormente comprimido na estação de reabastecimento [46, 47].

Ao abrigo do projecto LUCIS – Demonstração de pilhas de combustível a H₂ em ambiente real, alguns municípios e empresas portuguesas receberam sistemas alimentados a células de combustível a H₂. O projecto promovido pelo INEGI (Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial), pelo INETI (Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação) e pela SRE (Soluções Racionais de Energia) teve como objectivo demonstrar as vantagens da utilização das células de combustível a H₂ em ambiente real [48]. O projecto decorreu de 2007 a 2008 e demonstrou diversas configurações e especificações da aplicação da célula de combustível a H₂ [49]. As autarquias de Albufeira e de Torres Vedras aderiram ao projecto. A câmara Municipal de Albufeira recebeu quatro projectos de demonstração das células de combustível a H₂ e a câmara de Torres Vedras dois projectos. A empresa Auto-estradas do Atlântico e a Autosil também aderiram ao projecto LUCIS. Um dos promotores do projecto, o INETI, também recebeu as células de combustível para demonstração da utilização, neste caso aplicadas à iluminação das saídas de emergência [48].

O projecto EDEN – Endogenizar o Desenvolvimento de Energias Novas, que pretendeu dinamizar a criação de uma plataforma que promova a emergência da Economia do H₂. Este projecto com seis PPS (Producto, Projecto ou Sistema) levou à criação de um sistema pioneiro de produção de H₂ a partir de fontes de energia renovável, com o PPS 3 [50, 51]. A partir de 2008 a energia excedentária do parque eólico da ilha de Porto Santo é transformada em H₂ que é armazenado a 30 bar num tanque [52, 53]. Consoante as necessidades o H₂ é encaminhado para as células de combustível onde produzirá de novo a electricidade, tendo capacidade para 7,5kW [53]. A ilha de Porto Santo foi seleccionada para conter o sistema de produção de H₂ a partir de fontes de energia renovável, pois é apontada a nível comunitário como tendo forte potencial para se tornar “totalmente renovável” [50].

Nos Açores também se tem efectuado Investigação e Desenvolvimento no âmbito da Economia do H₂ renovável. As investigações levadas a cabo pelo LAMTec (Laboratório de Ambiente Marinho e Tecnologia) ao abrigo do PRAI-Açores (Programa Regional de Acções Inovadoras – Açores) possibilitaram, de 2003 a 2006, a criação de um parque tecnológico interactivo em energias renováveis e H₂ renovável, nos Açores [54, 55]. Os projectos Hymac e Hydrobus, financiados pela INTERREG, estabeleceram uma parceria entre os arquipélagos dos Açores, da Madeira e das Canárias. Com o Hymac (de 2004 a 2007) o objectivo foi identificar as tecnologias de produção, armazenamento e utilização do H₂ enquanto combustível terrestre, indicando as vantagens e desvantagens de cada [56]. O Hydrobus, que decorreu de 2003 a 2005, pretendeu demonstrar a viabilidade técnica e económica de um sistema de transporte de passageiros a H₂, com este produzido por energia eólica [57].

O HYRREG é uma iniciativa financiada pela Comissão Europeia através do programa Interreg IV B, de forma a impulsionar a economia do H₂ no Sudoeste Europeu, da qual Portugal é abrangido. O objectivo do projecto é promover o desenvolvimento e a competitividade na região SUDOE (Sudoeste Europeu) relativamente à tecnologia do H₂ e às pilhas de combustível. Com o HYRREG pretende-se criar na região SUDOE um caminho para a economia do H₂, através da colaboração de diferentes empresas e Universidades, identificando deste modo os impactos ambientais e económicos do H₂ [58]. Em Portugal participam o Instituto Superior Técnico (IST) e o Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ) [58]. O projecto iniciou-se em 2009 com uma duração de 30 meses, ou seja, terminará em Outubro de 2011 [58, 59].

2.8. Revisão Bibliográfica

O impacto ambiental provocado pelo consumo de hidrocarbonetos e do próprio carvão tem impulsionado a ideia de utilizar o H₂ como combustível alternativo. Têm-se realizado desde então alguns estudos de ACV da produção e utilização do H₂, de forma a verificar se este se apresenta ambientalmente como combustível alternativo.

Koroneos et al. [60] efectuaram uma ACV da produção do H_2 . O estudo em questão analisou o ciclo de vida para produção de H_2 a partir de GN por reformação a vapor (*steam reforming*) e a partir de fontes de energia renovável. As fontes de energia renovável analisados no estudo foram a hidroeléctrica, a biomassa, a energia eólica, a energia solar térmica e a energia solar fotovoltaica para conversão directa. O software utilizado na análise de ciclo de vida em questão foi o Global Emission Model for Integrated Systems (GEMIS) desenvolvido pelo Otto-Institute (Institute of Applied Ecology e.V.). O estudo demonstrou que das formas de produção de H_2 , energia eólica é a que apresenta menores impactes ambientais relativos ao ciclo de vida. A produção de H_2 a partir de energia solar fotovoltaica por conversão directa foi a que apresentou pior desempenho ambiental. No presente estudo conclui-se ainda que a produção de hidrogénio por reformação a vapor do GN é o método entre os analisados com mais emissões de GEE.

Um outro estudo [61] realizado pelos mesmos autores investigou os aspectos ambientais quer do querosene quer do H_2 aplicados a aeronaves. A ACV do H_2 levou em conta as fontes e os métodos de produção referidos no estudo apresentado anteriormente. No presente estudo de Koroneos et al. foi efectuado uma ACV do querosene. O estudo concluiu que a produção de H_2 por reformação a vapor do GN é o que mais contribui para o PAG, tendo em conta a ACV dos dois combustíveis em estudo e as respectivas fontes e métodos de produção. Na mesma análise verificou-se ainda que o ciclo de vida do querosene é o que mais impactes tem sobre a acidificação e sobre as emissões smog de inverno. Contudo a produção de H_2 recorrendo à biomassa é a que mais contribui para o efeito de eutrofização. Por fim no estudo foi efectuada uma ACV dos dois combustíveis aplicados na aviação, para diferentes aeronaves (análise WTW). O estudo concluiu deste modo que a utilização de querosene como combustível de aviação apresenta piores desempenhos ambientais que a utilização de H_2 produzido por qualquer uma das fontes e métodos analisados.

Mais tarde, em 2007, Koroneos et al. [62] apresentaram um novo estudo de ACV do H_2 . O estudo em questão apresenta a ACV do H_2 recorrendo à biomassa através de dois processos. No estudo é efectuada uma comparação da ACV da produção de H_2 por gaseificação da biomassa seguida de reformação do gás síntese com a produção deste recorrendo à gaseificação seguida de geração de electricidade e electrólise. Na ACV foi considerada a aquisição da biomassa e seu transporte, a gaseificação da biomassa, a produção de H_2 por electrólise ou por processo de reformação a vapor e por fim o processo de liquefacção e armazenamento do H_2 . A classificação dos dados de impacto ambiental foi efectuada utilizando a metodologia EcoIndicador 95 e tendo em consideração que o estudo se insere sob uma área agrícola da Grécia.

Verificou-se no estudo que a produção de H_2 por gaseificação com reformação do gás síntese apresenta melhor eficiência relativamente ao outro processo analisado. Contudo relativamente aos impactes ambientais, a produção de H_2 por gaseificação seguida de geração de electricidade e electrólise apresenta melhor desempenho.

Um artigo publicado em 2005 por Utgikar and Thiesen [63] evidencia um estudo de ACV do H_2 produzido por electrólise de alta temperatura recorrendo como fonte primária de energia a reactores nucleares. Os impactes ambientais são apresentados sobre duas categorias, sendo elas, PAG e potencial de acidificação. A ACV quantifica os impactes ambientais da usina nuclear combinada com electrólise de alta temperatura. Posteriormente os resultados dos impactes ambientais são comparados com a ACV do H_2 produzido pelos métodos referidos nos dois primeiros estudos. Das fontes analisadas, apenas a produção de H_2 a partir de energia eólica e de energia hídrica apresenta menores impactes ambientais que a produção de H_2 por um sistema de energia nuclear de electrólise de alta temperatura.

Mais recentemente em 2008, nos Estados Unidos, foi publicado um artigo realizado por Joseck et al. [64], no qual são analisados o consumo de energia e as emissões da produção de H_2 a partir de gás de coque efectuando uma análise do poço às rodas (WTW). Esta análise é comparada com o consumo de energia e as emissões WTW nas opções convencionais de gasolina e gasóleo bem como na produção de H_2 por reformação de GN e por gaseificação do carvão em plantas centrais. No estudo em questão o software de ACV utilizado foi o GREET (*Greenhouse gases, Regulated Emissions and Energy use in Transportation*), desenvolvido pela Argonne National Laboratory. O estudo revelou que numa análise WTW, a produção de H_2 por gás de coque é mais eficiente energeticamente comparando com os restantes métodos analisados. Considerando a análise WTW, com excepção do terceiro cenário, a produção de H_2 por gás de coque apresenta menores emissões de GEE. No entanto, na mesma análise WTW, o terceiro cenário apresenta menos emissões de GEE do que opções convencionais de gasolina e gasóleo e a produção de H_2 por reformação de GN.

Um estudo realizado por Dufour et al. [65] avaliou, recorrendo à ACV, os processos de reformação a vapor do GN com sistema CCS, de decomposição térmica, de decomposição catalítica com 96% de conversão, de decomposição catalítica com 70% de conversão e de decomposição termocatalítica. A base de dados utilizada para calcular o inventário do ciclo de vida (ICV) foi o Ecoinvent e a avaliação foi efectuada no SimaPro 7.1.

O estudo concluiu que embora a reformação a vapor do GN apresente acoplado o sistema CCS, as emissões de dióxido CO_2 equivalente por Nm^3 de H_2 produzido são superiores às dos restantes processos analisados. Verificou-se que as emissões de CO_2 equivalente por Nm^3 de H_2 produzido recorrendo a decomposição catalítica com 96% de conversão são duas vezes inferiores às da produção da mesma quantidade de H_2 por reformação a vapor do GN com sistema CCS. Relativamente ao rácio de energia, o processo de decomposição catalítica com 96% de conversão apresenta melhor desempenho energético, em contra partida a decomposição térmica é a que apresenta pior rácio de energia. A decomposição catalítica com 96% de conversão apresenta menores impactes globais. A decomposição catalítica com 70% de conversão apresenta impactes globais semelhantes à decomposição termocatalítica e à decomposição térmica.

3. Análise do Ciclo de Vida

A ACV, definida inicialmente nos Estados Unidos da América em 1990 como “*Life Cycle Assessment*” (LCA), tem como objectivo a avaliação do impacto ambiental associado a um combustível, produto ou serviço ao longo de todo o seu ciclo de vida [66, 67]. Contudo na década de 70, impulsionados pela crise petrolífera, registaram-se alguns estudos que se assemelham a ACV, embora estes se tenham baseado essencialmente em estudos energéticos [67].

Na Figura 25 são apresentadas as principais fases associadas ao ciclo de vida de um produto.

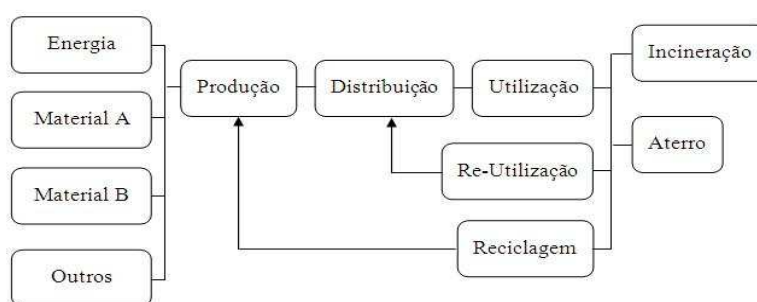


Figura 25 – Principais fases associadas ao ciclo de vida de um produto [67].

Existem normas que definem os princípios associados à ACV. Em 2006, houve uma segunda publicação das normas associadas à ACV, por parte da ISO (*International Organization for Standardization*). Esta publicação agrupa as normas anteriores nas normas ISO 14040 e ISO 14044 [68].

A norma ISO 14044 especifica os requisitos e as orientações para uma ACV. Esta norma foi desenvolvida de forma a preparar uma análise crítica da ACV fornecendo orientações sobre a avaliação de impactes ambientais [68].

A norma ISO 14040 descreve os princípios e estruturas base de uma ACV. Esta norma define ACV como “compilação dos fluxos de entradas e saídas e a avaliação dos impactos ambientais associados a um produto ao longo do seu ciclo de vida”, acrescenta ainda sobre a ACV “estados consecutivos e interligados de um produto, desde a extracção de matérias-primas ou transformação de recursos naturais, até à deposição do produto na natureza” [67].

Segundo a norma ISO 14040, a metodologia de ACV possui quatro fases principais, sendo elas, definição do objectivo e do âmbito da análise, inventário dos processos envolvidos, avaliação dos impactes ambientais e interpretação dos resultados [67]. As fases da ACV, segundo a norma ISO 14040, assim como a interactividade entre elas, encontram-se representadas na Figura 26.



Figura 26 - Principais fases de uma ACV, segundo a norma ISO 14040 [67].

No entanto uma ACV não necessita de seguir todas as fases descritas acima. Algumas análises focam-se apenas nas duas primeiras fases, dando especial atenção à fase de inventário. Neste caso a análise é designada por ICV ou na literatura inglesa LCI (*life cycle inventory*) [67].

De seguida é apresentada uma breve descrição de cada uma das fases de uma ACV segundo a norma ISO 14040.

- Definição do âmbito e objectivo

Nesta fase é efectuada uma definição e descrição do produto, processo ou actividade [66]. Será necessário definir as razões que levaram a realização da ACV, o objecto de estudo, a função que o produto desempenha, bem como, a quem se destinam os resultados. Nesta fase um bom conhecimento do objectivo do estudo permite direccionar algum tempo para a descrição de aspectos relevantes do estudo da ACV. A descrição destes aspectos permitirá uma melhor condução do estudo de ACV, minimizando o esforço necessário.

A unidade funcional é algo que se apresenta como indispensável no estudo da ACV de um produto ou serviço, uma vez que esta responde às necessidades de quantificar a função produto ou serviço. A unidade funcional não é mais que uma referência sobre a qual se realizará o inventário. Esta deverá descrever uma função relacionada com uma utilização, uma vez que possui uma relação directa com a função e não com a utilização. Deste modo a comparação da ACV de dois produtos é efectuada tendo em conta a mesma unidade funcional. Caso estes não apresentem a mesma unidade funcional, será necessário encontrar uma referência única [67].

- Inventário

A fase de inventário é a que requer mais tempo numa ACV. No inventário quantifica-se as entradas e saídas num ciclo de vida de um produto ou serviço. Nesta fase será necessário definir as condições fronteira do sistema, elaborar o diagrama de blocos representativo do sistema, recolher informação e analisar a sua qualidade, processar os dados, analisar os resultados e eventualmente redefinir as condições fronteira do sistema [67].

Após concluída a primeira fase (definição do âmbito e objectivo) será necessária uma primeira definição das condições fronteira.

Na Figura 27 pode-se observar a representação entre a ACV e as condições fronteira do sistema.



Figura 27 – Representação da interacção entre o sistema e o ambiente [67].

A esquematização do diagrama de blocos representativo do sistema não é mais que uma representação esquemática dos processos mais relevantes do ciclo de vida em estudo. Este diagrama é muito útil pois possibilita uma visão global do processo em estudo. Este é constituído por blocos e setas. Os blocos representam os processos elementares e as setas que ligam os blocos entre si representam os fluxos de massa e energia.

Na recolha de informação devem ser integrados critérios baseados no nível de contribuição mássica, energética e ambiental. No entanto, durante a recolha pode haver necessidade de decompor alguns processos em sub-processos, e agrupar alguns por não haver a informação necessária que os caracterize. Para a análise dos dados existem indicadores que podem ser usados para avaliar a consistência dos dados recolhidos relativamente aos objectivos iniciais [67].

Após quantificação dos processos elementares do estudo da ACV inicia-se o processamento dos dados. Nesta etapa é elaborada a transformação dos dados de modo a possibilitar os cálculos dos contributos dos diversos impactos gerados ao longo do ciclo de vida, ou seja, são agrupadas as quantidades emitidas de cada substância referentes aos vários processos [67].

A análise dos resultados está directamente relacionada com objectivo do estudo, o qual é caracterizado a nível geográfico, temporal e tecnológico. A análise de resultados necessita ainda de uma análise crítica, no caso do estudo da ACV se destinar ao público [67].

- Avaliação dos Impactes ambientais

A fase de avaliação dos impactes ambientais engloba a selecção das categorias do impacto ambiental e do método de avaliação a utilizar, a classificação, a caracterização, a normalização e a agregação das categorias do impacto ambiental.

A selecção das categorias do impacto ambiental deve ser efectuada de acordo com os objectivos que o estudo implica. Existem no entanto dois modelos de avaliação ambiental dependendo do indicador utilizado. Os modelos orientados para o problema baseiam-se nos indicadores intermédios e estão mais associados às intervenções ambientais. Em contrapartida os métodos orientados para o dano ambiental estão mais associados às consequências ambientais e baseiam-se nos indicadores finais, como representado na Figura 28 [67].

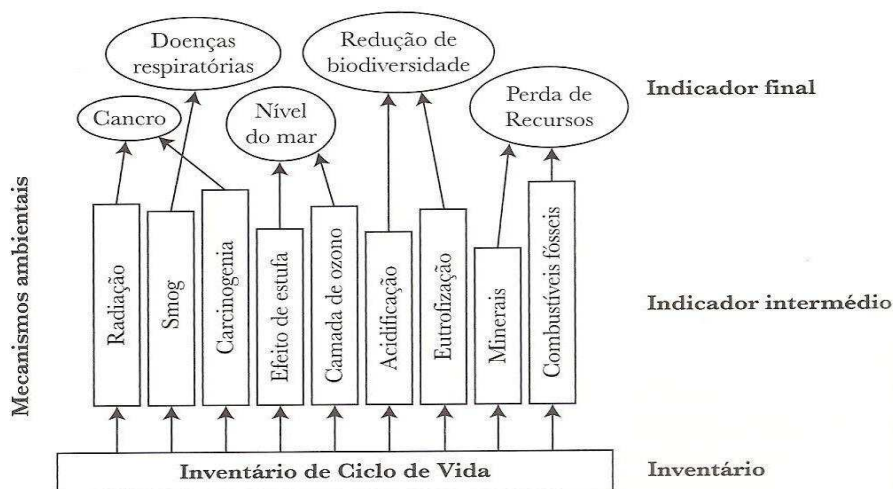


Figura 28 – Categorias do impacte ambiental [67].

A classificação consiste em especificar cada uma das categorias do impacto ambiental para as quais a cada uma das substâncias demitidas na ACV [67].

Na caracterização utiliza-se factores de ponderação sobre as quantidades associadas à intervenção ambiental, obtendo-se desta forma os contributos das intervenções ambientais para cada categoria do impacto ambiental.

Posteriormente é efectuada uma normalização destes valores dividindo-os por um valor de referência em cada categoria do impacte ambiental [67].

O objectivo da agregação de categorias do impacte ambiental é reduzir o número de indicadores ambientais que fundamenta a interpretação dos resultados e posterior avaliação dos impactes ambientais. A agregação obtém-se por ponderação tendo em conta critérios de importância relativa para um dado indicador ambiental.

Cada método de avaliação de impacte ambiental tem associada uma forma diferente de agregação de categorias de impacte ambiental. Na Figura 29 podem ser observadas as nove categorias de impacte ambiental do método Ecoindicador 95 [67].

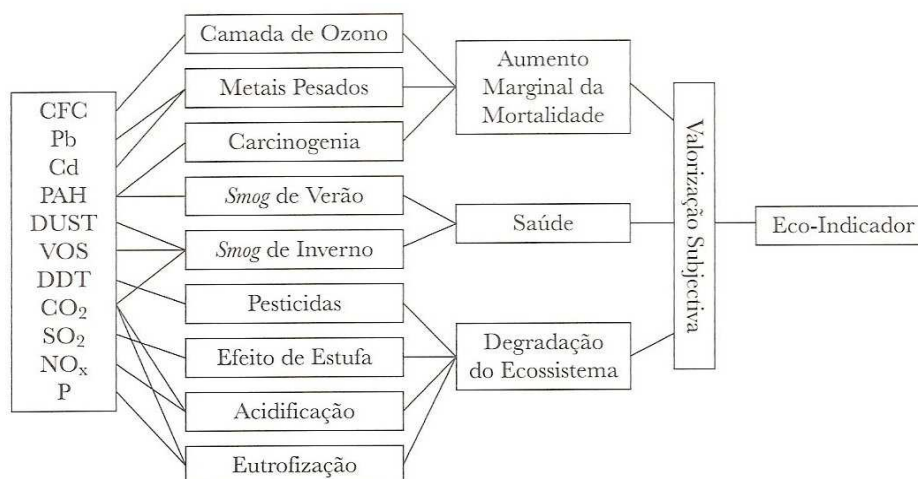


Figura 29 – Estrutura do mecanismo ambiental associado ao Ecoindicador 95 [67].

O Ecoindicador 99 é uma evolução do Ecoindicador 95 e quantifica a categoria do impacto ambiental na diminuição da qualidade de vida do ser humano como consequência do efeito de estufa, ou seja, o Ecoindicador 99 expressa-se em DALY (*Disability Adjusted Life Years*). Este Ecoindicador incorpora um maior número de aspectos ambientais e introduz um novo modelo de agregação designado por método orientado para o dano ambiental [67].

A ACV pode ser utilizada na comparação de produtos concorrentes. A utilização de menos matérias-primas por parte de um produto não implica que este tenha menos impactos ambientais. A ACV analisa todos os estágios do ciclo de vida de um produto, pode-se verificar que um produto que necessite de menos matérias-primas para sua fabricação tenha pior desempenho ambiental, que um outro produto concorrente que recorra a mais matéria-prima para fabricação [66]. A ACV pode também ser utilizada para identificar as modificações necessárias nos processos que constituem o ciclo de vida de um produto ou serviço, de forma a otimizar o desempenho ambiental destes. Podem ser quantificadas as descargas ambientais, durante o ciclo de vida a analisar, quer estas sejam para o solo, a ar ou para a água. Esta pode também servir como processo de decisão em políticas públicas [67].

Contudo a ACV para além dos benefícios possui algumas limitações. A limitação mais evidente prende-se com o facto da informação por esta cedida no estudo de vida do produto não ser o único contributo num desenvolvimento de um produto, ou seja, devem existir outras componentes como o custo e o desempenho para além da informação cedida no estudo de ACV, na análise de desenvolvimento de um produto. Este facto acontece pois a ACV não determina qual o produto ou processo mais eficiente ou com menor custo.

Para um estudo completo de ACV necessita de muita informação e muito tempo. Assim sendo ter-se-á que analisar o objectivo e para quem se dirige o estudo da ACV, de forma a balancear os benefícios do estudo com o tempo dispendido e consecutivamente com os recursos financeiros [66].

4. Metodologia

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada na execução do presente trabalho. Inicialmente serão descritas as etapas do trabalho bem como a sua calendarização. Posteriormente apresentar-se-á uma descrição do modelo base do trabalho, o GREET, de seguida uma descrição do modelo GEMIS e por fim será apresentada uma descrição da elaboração e do funcionamento do modelo MACV2H₂.

4.1. Plano de trabalho

Numa fase inicial, começou-se por efectuar uma pesquisa bibliográfica. Nesta fase efectuou-se uma pesquisa de documentos técnico-científicos relativos ao H₂. A pesquisa centralizou-se essencialmente na ACV do H₂ a nível mundial, quer esta tenha sido efectuada com o modelo GREET ou outro modelo. A pesquisa também se focalizou na aplicação do H₂ no sector dos transportes, tendo por base as análises do poço à bomba (“well-to-pump” - WTP) e do poço à roda (“well-to-wheel” - WTW).

A pesquisa sobre o H₂ não se baseou unicamente no seu ciclo de vida. Numa fase posterior e que de alguma forma decorreu simultaneamente à pesquisa bibliográfica, efectuou-se uma pesquisa de informação sobre o H₂. Esta pesquisa focou-se na situação actual do H₂ no sector dos transportes a nível mundial e posteriormente na situação do H₂ em Portugal. Nesta fase efectuou-se também uma pesquisa relativa não só às matérias-primas a partir das quais se pode obter H₂, como às propriedades físico-químicas do H₂. A pesquisa em questão baseou-se também nas formas mais utilizadas na produção de H₂, uma vez que este não se encontra disponível na natureza como combustível, bem como no armazenamento do H₂ e posterior transporte.

Numa fase posterior foi efectuado um levantamento de informação relativo ao ciclo de vida do H₂. Neste caso efectuou-se um levantamento de informação relativa à produção, ao transporte, ao armazenamento e à utilização do H₂ como combustível. Considerou-se não só a produção de H₂, como a extracção e refinação dos próprios combustíveis fósseis que permitem a produção de H₂, assim como a produção de electricidade. Nesta fase a pesquisa incidiu nas características dos combustíveis, tais como a massa volúmica, o PCI e o PCS, as fracções de carbono e enxofre dos combustíveis, bem como as eficiências de extracção, produção e refinação dos combustíveis. Relativamente aos veículos na fase de utilização, apenas se considerou os meios terrestres, efectuando-se desta forma pesquisa sobre os factores de consumo e de emissões dos veículos seleccionados. Contudo relativamente ao transporte de matérias-primas e de combustíveis foi considerado o transporte via marítima e via terrestre recolhendo-se os factores de emissão e de consumo relativos não só ao transporte como ao consumo dos próprios meios de transporte.

Após a recolha dos dados sobre o ciclo de vida do H_2 , procedeu-se à actualização da base de dados do modelo GREET. Esta alteração originou um novo modelo designado por MACV2H₂ (Modelo de Análise de Ciclo de Vida para o Hidrogénio). O referido modelo permite não só a análise do ciclo de vida do H_2 como também dos principais combustíveis em utilização em Portugal, contudo o modelo denomina-se por Modelo de Análise de Ciclo de Vida para o H_2 uma vez que este foi elaborado com especial atenção para o H_2 , sendo esse o tema da presente dissertação.

Ao desenvolver o MACV2H₂ por alteração/actualização do modelo GREET, foi necessário recorrer a uma nova base de dados. Esta situação deu-se pelo facto de o GREET considerar a produção de electricidade por fontes renováveis como tendo zero emissões, ou seja, o modelo GREET não considera os poluentes emitidos na produção das tecnologias para geração de electricidade de forma renovável. Deste modo recorreu-se à base de dados do modelo Alemão GEMIS (Global Emission Model for Integrated Systems) desenvolvido pelo Öko-Institut e pelo Gesamthochschule Kassel. Nesta base de dados recolheu-se o consumo energético e as emissões relativas à produção dos painéis fotovoltaicos e das torres eólicas. Posteriormente os valores foram inseridos no MACV2H₂, sendo incorporados tanto na produção de electricidade como na produção de H_2 por recurso a energia eólica ou energia solar fotovoltaica. De salientar também o facto de a produção de hidrogénio por recurso a energia eólica ter sido acrescentada relativamente ao modelo GREET, ou seja, o modelo GREET não permite efectuar uma simulação de uma ACV da produção de H_2 por energia eólica, sendo que o consumo de energia e as emissões do transporte e distribuição, da compressão ou da liquefacção e armazenamento do H_2 foram consideradas as que o GREET assume para o solar fotovoltaico. A figura seguinte apresenta esquematicamente a comunicação entre o GREET e o GEMIS, originando o MACV2H₂. O MACV2H₂ permite de forma rápida e sucinta uma ACV do H_2 e dos principais combustíveis utilizados em Portugal. Na quarta secção do presente capítulo será explicado de forma sucinta o funcionamento do MACV2H₂.

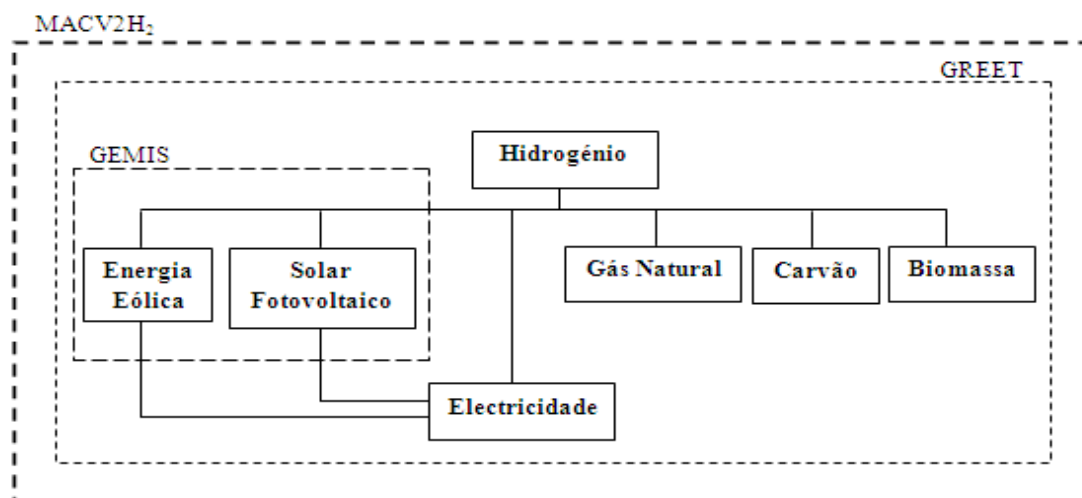


Figura 30 – Representação da comunicação do GREET com a base de dados do GEMIS, originando o MACV2H₂.

Na Figura 31 encontra-se um fluxograma do plano de trabalho da dissertação em questão e na Figura 32 a calendarização do referido plano de trabalho.

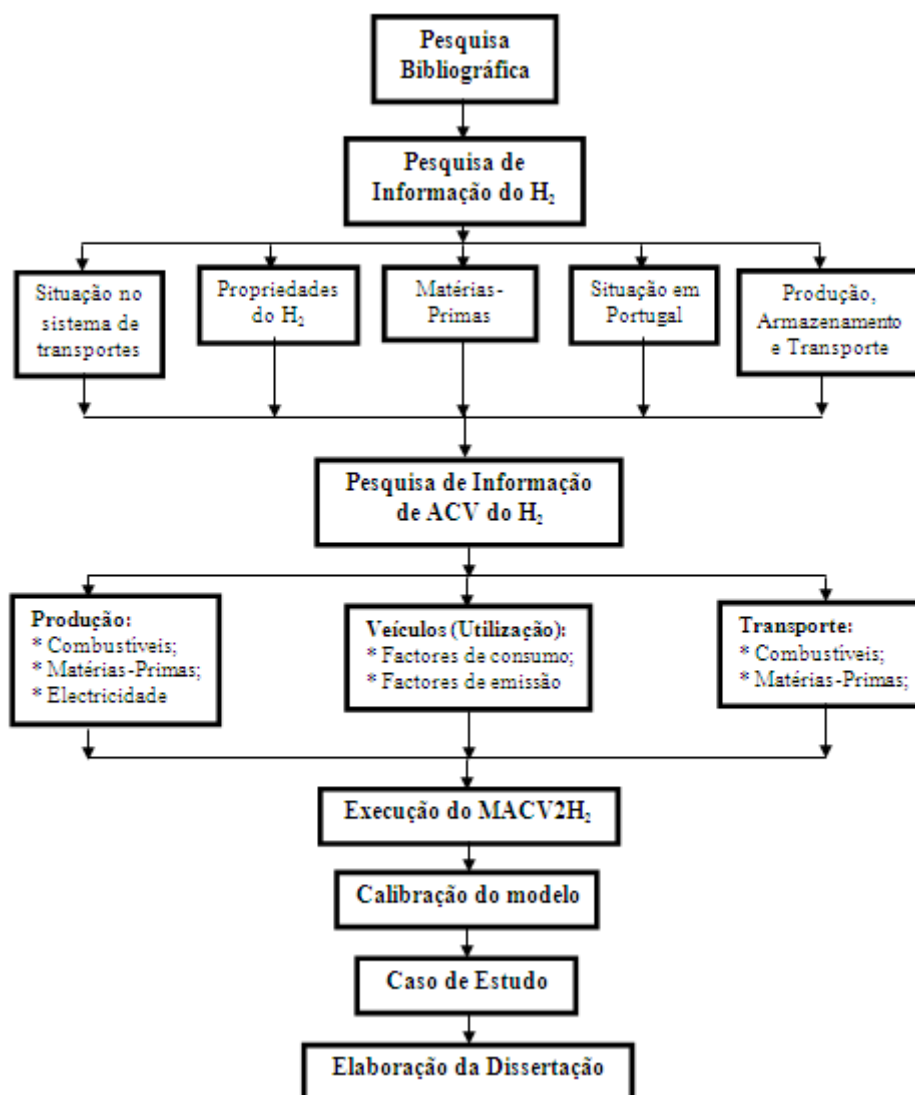


Figura 31 – Fluxograma do plano de trabalho da Dissertação.

	2010								
Tarefas	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro
Pesquisa Bibliográfica									
Pesquisa de informação do H ₂									
Pesquisa de informação sobre ACV do H ₂									
Execução do MACV2H ₂									
Caso de Estudo									
Elaboração da Dissertação									

Figura 32 – Calendarização do plano de trabalho da Dissertação.

4.2. O modelo GREET

O modelo designado por “Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation” ou mais conhecido por GREET, é um modelo completo de ACV de combustíveis desenvolvido pelo Argonne National Laboratory. Este modelo permite avaliar vários veículos e combinações de combustível, numa análise WTP ou numa WTW, como se apresenta na Figura 33. Na análise WTP, é considerada a extracção, a produção e o transporte dos combustíveis até aos respectivos postos de abastecimento. A análise WTW engloba a análise WTP e a análise da bomba às rodas, ou seja, nesta análise para além de se considerar todos os processos relacionados com o combustível até este chegar ao posto de abastecimento (extracção, a produção e o transporte) também é considerada a utilização do combustível em veículos. Esta análise WTW engloba todo o ciclo de vida do combustível [69].

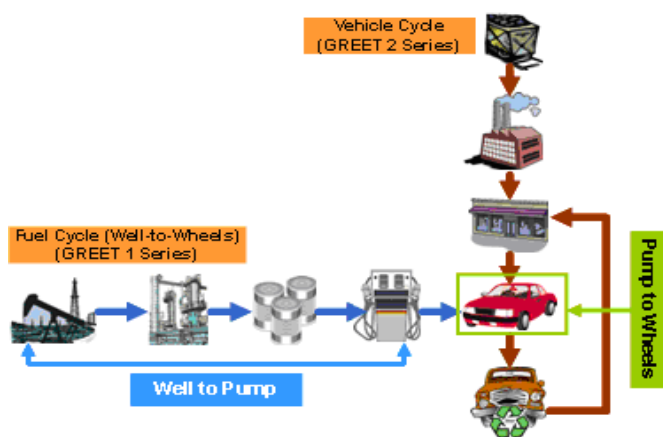


Figura 33 – Representação da análise de ciclo de vida efectuada pelo GREET [69].

O GREET é uma ferramenta de ACV desenvolvida sobre a plataforma Microsoft Excel, o qual é composto por 30 folhas de cálculo com as células codificadas por cores. O modelo apresenta a codificação das células em seis cores, sendo elas o branco (incolor), amarelo, verde, azul, cinzento e células com triângulo vermelho no canto superior direito. As células brancas são essencialmente para cálculos e suposições secundárias. As células amarelas representam pressupostos essenciais para o modelo funcionar. Estas células podem ser alteradas pelo usuário nas suas próprias simulações. As células verdes representam hipóteses de entrada chave baseadas em funções de distribuição de probabilidade. As células azuis são previsões assumidas pelo modelo GREET para que as simulações estocásticas possam correr. As células cinzentas correspondem a espaços reservados. Embora as simulações desses espaços sejam concluídas no GREET, nenhuma pesquisa foi efectuada para os comprovar. As células com um triângulo vermelho no canto superior possuem comentários de forma a orientar o utilizador do modelo GREET.

Na figura seguinte é possível observar a codificação das cores das células assim como a descrição das folhas de cálculo.



Figura 34 – Aspecto da folha de visão geral do modelo GREET 1.8c_0.

O modelo em questão é o GREET 1.8c_0. De seguida apresentar-se-á uma descrição das folhas de cálculo presentes no GREET 1.8c_0 [69].

- **Overview** – Nesta folha de cálculo é efectuada uma introdução ao modelo, apresentando os aspectos gerais, bem como as codificações das cores das células e a descrição das folhas de cálculo. É também nesta folha que se encontra a declaração de direitos de autor.
- **Inputs** – A folha de cálculos de entrada, como o próprio nome indica é a folha onde o utilizador introduz os dados necessários para a simulação correr.
- **EF_TS** – Apresenta tabelas com os factores de emissão ao longo dos anos incluindo projecções da evolução dos factores de emissão para as tecnologias de combustão abrangidas.
- **EF** – Contém os factores de emissão das novas tecnologias de combustão, por tipo de combustível. Esta folha interage com folha EF_TS.
- **Fuel_Specs** – Apresenta as especificações de cada combustível e os potenciais de aquecimento global dos GEE.
- **T&D_Flowcharts** – Apresenta diagramas de transporte e distribuição de cada matéria-prima energética e combustível.
- **T&D** – São efectuados os cálculos do consumo de energia e emissões associadas ao transporte e distribuição de matérias-primas energéticas.

- Urban_Shares – São efectuados os cálculos das fracções urbanas das emissões totais de gases poluentes associados à análise contemplada na avaliação de ciclo de vida.
- Fuel_Prod_TS – Apresenta uma série de projecções paramétricas relativas aos processos de produção de combustíveis do poço à bomba. Esta folha interage com as folhas de produção de outros combustíveis.
- Petroleum – Apresenta os cálculos do consumo de energia WTP e as emissões de combustíveis derivados do petróleo, incluindo a produção de aditivos. Os derivados do petróleo incluídos na folha de cálculo em questão são, a gasolina convencional, a gasolina reformulada, a gasolina reformulada na Califórnia, o gasóleo convencional, o gasóleo de baixo teor de enxofre, o GPL, a nafta de petróleo bruto e o fuel óleo.
- NG – Apresenta os cálculos do consumo de energia WTP e as emissões de combustíveis à base de gás natural. O consumo e as emissões podem ser obtidos de acordo com três tipos de combustíveis base, sendo estes, o GN Norte-Americano, o GN não Norte-Americano e o Gás queimado não Norte-Americano.
- Hydrogen – Apresenta os cálculos do consumo de energia WTP e as emissões das formas de produção de H₂.
- Ag_Inputs – Contém os cálculos do consumo de energia e emissões associados à produção de insumos agrícolas tais como fertilizantes, herbicidas e insecticidas e fabricação de máquinas agrícolas
- EtOH – Apresenta os cálculos do consumo de energia WTP e as emissões para a produção de etanol a partir de milho, cana-de-açúcar e produção de biomassa celulósica e butanol a partir do milho.
- E-D Additives – Folha de cálculos de consumo de energia e das emissões WTP, da aditivização do diesel com etanol.
- BD – Consumo de energia e das emissões WTP associadas à produção de biodiesel a partir de soja.
- Coal – Consumo de energia e das emissões para a mineração, limpeza e transporte do carvão.
- Uranium – Cálculo do consumo de energia e das emissões associadas à extracção e produção de combustível urânio.

- LF_Gas – Folha de cálculos do consumo de energia e das emissões para a recuperação de gás metano proveniente de aterros.
- Electric – Consumo de energia e das emissões associadas à geração de energia eléctrica. No caso das fontes renováveis para produção de electricidade, o modelo GREET considera-as como tendo emissões zero, ou seja, o modelo não considera as emissões associadas à construção das instalações de fontes renováveis.
- Compression – Consumo de energia e da eficiência do processo de compressão do GN e do H₂.
- Car_TS – Projecções para a economia de combustível e taxas de emissão de poluentes associadas ao funcionamento de veículos de passageiros.
- LDT1_TS – Projecções para a economia de combustível e taxas de emissão de poluentes associadas ao funcionamento de veículos ligeiros de 1.
- LDT2_TS – Projecções para a economia de combustível e taxas de emissão de poluentes associadas ao funcionamento de veículos ligeiros de mercadorias 2.
- Vehicles – Cálculos do consumo de energia e das emissões no funcionamento dos veículos.
- Results – Folha de resultados da simulação realizada. Os resultados podem ser apresentados na análise WTP ou WTW para várias combinações de veículos e combustíveis.
- Graphs – Apresentação de forma gráfica do consumo de energia e das emissões para diferentes combinações de veículos e combustíveis. Ou seja, nesta folha é apresentado graficamente os resultados da folha anterior (Results).
- Dist_Spec – Folha de especificações detalhadas dos parâmetros de entrada construídos a partir de funções de distribuição.
- Forecast_Specs – Folha de informação detalhada associada às previsões para realizar a simulação estocástica.
- Forecast_Deleted – Folha com lista das previsões apagadas da folha de cálculo anterior (Forecast_Specs).

O modelo GREET inclui mais de 100 formas de produção de combustíveis e mais de 70 sistemas de veículo combustível, a produção de combustíveis contemplada de um modo

geral no GREET é apresentada de forma esquemática na Figura 35. Para uma determinada combinação de veículo e combustível o modelo GREET calcula [69]:

- Não só o consumo total de energia quer esta seja proveniente de fontes de energia renovável ou não renovável, como o consumo de combustíveis fósseis (GN, Petróleo, Carvão).
- Emissões de gases de efeito de estufa, expressos em CO₂ equivalente. Os gases com maior ênfase no efeito de estufa são o CO₂, o CH₄ e o óxido de nitroso (N₂O).
- Emissões de poluentes locais, como é o caso do CO, do NO_x, do SO_x e das PM quer estas tenham diâmetro inferior a 10 µm (PM10) ou diâmetro inferior a 2,5 µm (PM2,5).

As simulações efectuadas no GREET podem ser analisadas ao longo do tempo, uma vez que este permite simulações de sistemas de veículos e produção de combustíveis em períodos de cinco em cinco anos desde 1990 até 2020 [69].

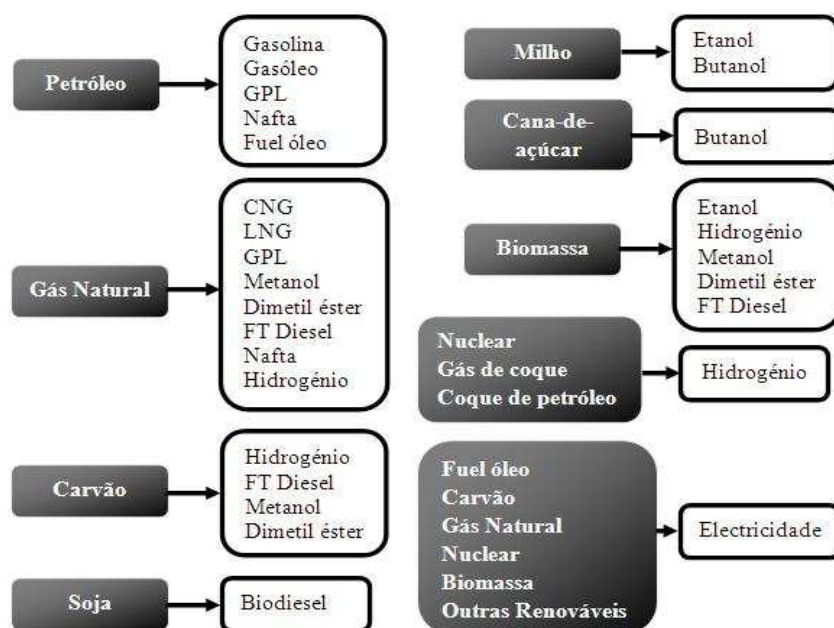


Figura 35 – Esquema das vias de produção de combustíveis considerados no modelo GREET.

O modelo GREET abrange várias tecnologias de veículos. De seguida serão apresentadas as tecnologias de veículos que o modelo em questão abrange [69].

- Veículos com motores convencionais de ignição;
- Veículos com motores de ignição por faísca com injeção directa;
- Veículos com motores de ignição por compressão com injeção directa;
- Veículos híbridos eléctricos independentes;

- Veículos híbridos eléctricos Plug-in;
- Veículos com célula de combustível;
- Veículos eléctricos.

De salientar o facto de as folhas de cálculo de modelo GREET comunicarem entre si. Na figura seguinte será um apresentado um esquema da comunicação da folha de cálculo do H₂ (Hydrogen) com as restantes.

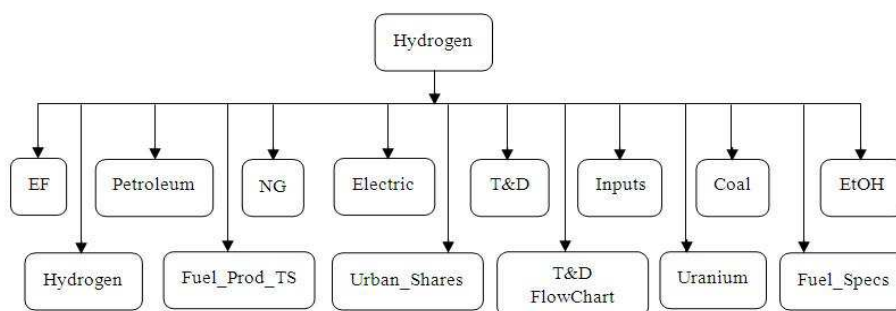


Figura 36 – Esquema de comunicação da folha de cálculo Hydrogen.

No modelo GREET são contempladas várias formas de produção de H₂, incluindo a produção deste na forma gasosa ou líquida. Na figura seguinte é apresentado um esquema das formas de produção de H₂ consideradas no GREET.

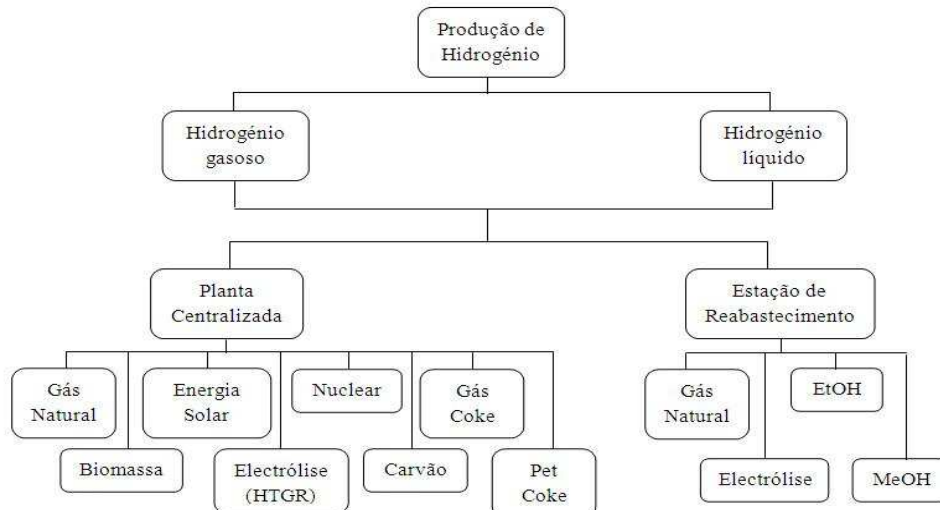


Figura 37 – Esquema das formas de produção de hidrogénio consideradas no GREET.

4.3. O modelo GEMIS

GEMIS, que como já referido anteriormente é o acrónimo de Global Emission Model for Integrated Systems, é uma base de dados de ACV desenvolvida pelo Otto-Institute (Institute of Applied Ecology e.V.). O modelo em questão permite não só uma ACV como uma análise de custos dos combustíveis, da energia e dos processos de transporte.

No GEMIS o usuário pode recorrer aos vários itens de forma a formar um processo, ou usufruir dos mais 8000 processos em mais de 20 países que a base de dados do modelo incorpora.

Ao contrário do modelo GREET, o GEMIS não corre em formato EXCEL (Figura 38). Na janela do GEMIS, ao passar o rato sobre os ícones que se encontram abaixo do menu, é apresentada uma pequena explicação da funcionalidade de cada ícone.

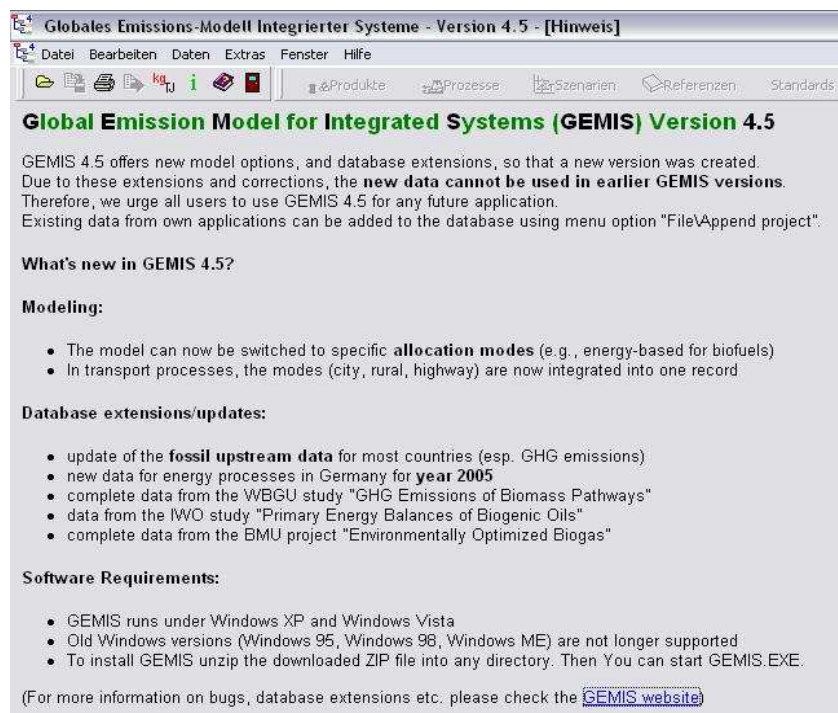


Figura 38 – Ambiente inicial da janela de trabalho do modelo GEMIS.

Este modelo Alemão permite a apresentação dos resultados em diferentes tipos de unidades, bem como as unidades dos dados de entrada. Contudo tal como no GREET, o GEMIS incorpora um código de cores. O código de cores é apresentado de acordo com a fonte dos respectivos dados.

No menu “Products” são apresentados do lado esquerdo todos os produtos ordenados alfabeticamente e com os respectivos códigos de cores. No lado direito da janela do modelo são apresentadas as informações relevantes do produto seleccionado. Podem ainda ser alteradas as características do produto, tais como, PCI ou PCS, a densidade e o custo.

No menu “Processes” tal como no menu anterior, os processos são ordenados alfabeticamente do lado esquerdo com os respectivos códigos de cores. O lado directo do painel está reservado às informações relevantes do processo seleccionado. Contudo no lado direito também existe a opção “Filter” que permite uma procura do processo. No lado direito do painel existe a opção “Process Chain” em que é apresentada de forma esquemática as ligações do processo seleccionado com outros, como uma cadeia de

processos. Os resultados do consumo energético e das emissões do processo seleccionado podem ser obtidos seleccionando o menu “Results” no lado direito do painel”. À semelhança do menu dos produtos, os processos também podem ser editados.

No menu “Scenarios”, os cenários também são apresentados no lado esquerdo do painel com o código de cores, sendo que do lado direito se alocam as informações do cenário seleccionado. Neste menu, também existe, do lado direito do painel a opção “Filter” que permite a procura de um determinado cenário. O modelo GEMIS apresenta dois tipos de cenários, um tipo unicamente energético e outro com múltiplas opções. À semelhança dos menus descritos anteriormente, este menu também pode ser editado. No menu dos cenários para além de observar os resultados sobre a forma de tabela também é possível visionar de forma gráfica, ou mesmo efectuar uma comparação de cenários.

O menu “References” apresenta de forma ordenada alfabeticamente e com o respectivo código de cores as referências. Estas localizam-se no lado esquerdo do painel, sendo que no lado direito do mesmo painel se pode encontrar a informação sobre a referência seleccionada bem como alguns comentários sobre a mesma. Do mesmo modo, no lado direito do painel é possível efectuar uma procura de uma referência seleccionando a opção “Filter”. As referências também podem ser editadas.

No menu “Standards” é possível encontrar os valores padrão das emissões para a EU e para os Estados Unidos. Estes valores também podem ser editados a qualquer momento.

De salientar ainda o menu “Extras” na barra de menus. Neste menu ao seleccionar a opção “Settings” é possível activar ou desactivar algumas opções, como por exemplo a fase de construção ou a fase de transporte móvel. De salientar que o facto de activar/desactivar a fase de transporte móvel não interfere com as tecnologias de transporte estacionário, como o caso dos gasodutos. Neste menu é possível também a escolha entre PCI ou PCS para a apresentação dos dados.

4.4. O modelo NETPAS

O NETPAS é um software que permite o cálculo de rotas marítimas. O software contém mais de 11000 portos e 60 milhões de tabelas de distância [70]. O NETPAS permite a edição de rotas marítimas, sendo neste caso utilizado para determinar as distâncias marítimas percorridas pelos petroleiros e pelos navios no transporte das matérias-primas e dos combustíveis dos diversos países de onde ocorrem as importações.

4.5. O modelo MACV2H₂

Como referenciado anteriormente, o principal objectivo da presente dissertação consiste na actualização do modelo GREET. O facto do modelo GREET não considerar as

emissões e os consumos energéticos da produção dos painéis fotovoltaicos e das torres eólicas levou à consulta da base de dados do GEMIS.

O MACV2H₂ surge da combinação entre o modelo GEMIS e o modelo GREET, incluindo a respectiva actualização deste para a realidade nacional e Europeia.

Apesar de o modelo MACV2H₂ compreender dados das duas bases de dados referidas anteriormente, o MACV2H₂ foi elaborado de maneira a que o utilizador consiga de forma simples e intuitiva realizar uma ACV.

A folha de cálculo “Dados de Entrada” requer a introdução por parte do utilizador de poucos dados, este facto proporciona uma simulação de uma ACV de forma rápida, simples e intuitiva. Desta forma o utilizador poderá efectuar uma primeira ACV dos combustíveis de forma simples e rápida.

Contudo o modelo também permite uma análise mais detalhada. Para tal é possível alterar os valores da base de dados de forma a estes possam descrever um determinado cenário.

De salientar o facto que o modelo MACV2H₂ manter uma estrutura semelhante ao GREET, sendo desenvolvido em plataforma Excel. O modelo é composto por vinte folhas de cálculo. No decorrer de uma simulação o modelo efectua os cálculos para as diversas etapas do ciclo de vida dos vários combustíveis intervenientes e para os consumos e emissões relativos aos veículos considerados no modelo.

No modelo MACV2H₂, cada folha de cálculo encontra-se dividida em pontos e sub-pontos, apresentando uma codificação de cores. Os pontos principais apresentam as letras a azul. À medida que se vai avançando para os sub-pontos a tonalidade do azul vai clareando.

Nas secções seguintes será abordado de forma sucinta o funcionamento do modelo MACV2H₂. A abordagem consistirá numa descrição de cada uma das folhas de cálculo indicando os respectivos pressupostos e referências utilizadas.

4.5.1. Apresentação

A folha de cálculo “Apresentação” não é mais que uma folha de rosto. Nesta folha são apresentadas algumas características do modelo, bem como a identificação do autor do modelo.

Para além de cada folha de cálculo se encontrar dividida por pontos codificados com cores, como referido anteriormente, as próprias células também apresentam uma codificação com cores.

Na presente folha de cálculo é efectuado um esclarecimento da codificação de cores. O modelo apresenta células de três cores, excluindo as células incolores. As células

verdes, correspondem as células sem valores atribuídos e que não necessitam de valor, as células amarelas representam os locais definidos para introdução de dados por parte do utilizador. Estas células encontram-se essencialmente na folha de cálculo “Dados de Entrada”. Por fim as células de cor âmbar representam as alterações efectuadas após as selecções verificadas na folha “Dados de Entrada”. O modelo apresenta ainda células em que as letras aparecem a vermelho. Quando acontece um erro na introdução de dados na folha “Dados de Entrada” o utilizador é alertado com uma mensagem com letras a vermelho.

A folha “Apresentação” contém ainda, para além da designação do acrónimo MACV2H₂, uma breve descrição dos procedimentos efectuados nas folhas de cálculo presentes no modelo. Desta forma o utilizador ao consultar a folha de cálculo inicial, poderá entender o funcionamento básico do modelo.

Na figura seguinte poderá ser observado o aspecto da folha inicial do modelo.

Universidade de Aveiro
theoria poiesis praxis

MACV2H₂

Modelo de Análise de Ciclo de Vida para o Hidrogénio

Breve descrição das folhas de cálculo do MACV2H₂

Folha de cálculo:	Descrição:
Apresentação	Dados do autor e descrição geral do modelo
Dados de Entrada	Introdução dos dados essenciais para a simulação
Combustíveis	Dados dos combustíveis e factores de aquecimento global dos gases de efeito de estufa
FE	Factores de emissão relativos às tecnologias de combustão
Petróleo	Cálculo do consumo energético e das emissões de poluentes associados à produção de combustíveis derivados do petróleo
Gás Natural	Cálculo do consumo energético e das emissões de poluentes associados à extracção e processamento do Gás Natural e à produção do GPL
Carvão	Cálculo do consumo energético e das emissões de poluentes associados à extracção e processamento do carvão
Etanol	Cálculo do consumo energético e das emissões de poluentes associadas à produção de etanol
Electricidade	Cálculo do consumo energético e das emissões de poluentes associados à produção eléctrica em Portugal
Fotovoltaico	Consumo de energia e emissões para produção de electricidade por painéis solares fotovoltaicos
Eólica	Consumo de energia e emissões para produção de electricidade por energia eólica
Hidrogénio	Cálculo do consumo energético e das emissões de poluentes associados à produção de hidrogénio
Fertilizantes	Cálculo do consumo energético e das emissões de poluentes associados à produção de fertilizantes, herbicidas e insecticidas
Compressão	Cálculo do consumo de energia para compressão
Transportes	Cálculo do consumo energético e das emissões de poluentes associados ao transporte das matérias-primas e dos combustíveis contemplados no modelo
Veículos	Cálculo do consumo de combustível e das emissões de poluentes associados ao funcionamento dos veículos
Resultados	Consumo energético e emissões do poço à bomba e do poço às rodas, relativos à simulação efectuada
Gráficos	Representação gráfica dos dados obtidos na folha de cálculo "Resultados"
Percurso	Resultados do consumo de energia e das emissões para um dado percurso simulado
Base de dados	Base de dados, com constantes essenciais ao funcionamento do modelo

Código de cores do MACV2H₂

- Valores a preencher pelo utilizador, essenciais para o funcionamento do programa
- Janelas alteradas após selecção, na folha de cálculo "Dados de Entrada"
- Células sem valor atribuído, não necessitam de nenhum valor

Letras: As letras a vermelho, significam um erro na introdução dos dados, na folha "Dados de Entrada"

Software desenvolvido por:
Sérgio Filipe Ramos Pereira
Universidade de Aveiro
Departamento de Engenharia Mecânica
nº 36490
E-mail: sergioramospereira@gmail.com

Figura 39 – Aspecto da folha de cálculo “Apresentação” do modelo MACV2H₂.

4.5.2. Dados de Entrada

A presente folha de cálculo é reservada ao utilizador, sendo nela que o utilizador poderá introduzir os dados de forma a poder efectuar a simulação pretendida. A folha “Dados de Entrada” encontra-se dividida em quatro pontos principais.

No primeiro ponto (Figura 40) o utilizador poderá seleccionar a quantidade de energia libertada por unidade de massa/volume, ou seja, se quer efectuar a simulação com os valores do PCI ou do PCS.

1. Dados de Entrada

1.1 - Selecção da quantidade de energia por unidade de massa ou volume libertada na oxidação de um combustível

1 1 - PCI (Poder Calorífico Inferior)
2 - PCS (Poder Calorífico Superior)

Figura 40 – Selecção da quantidade de energia libertada por unidade de massa/volume.

No segundo ponto são abordados os dados relativos à produção de H₂ (Figura 41).

2. Produção do Hidrogénio

2.1 - Percentagem de produção de Hidrogénio em cada local

	H ₂ Gasoso	H ₂ Líquido
Plantas centralizadas	100,0%	100,0%
Estação de reabastecimento	0,0%	0,0%

2.2 - Percentagem de cada matéria-prima para produção de hidrogénio em plantas centralizadas

	H ₂ Gasoso	H ₂ Líquido
Gás Natural	100,0%	100,0%
Solar Fotovoltaico	0,0%	0,0%
Eólica	0,0%	0,0%
Carvão	0,0%	0,0%
Biomassa	0,0%	0,0%

2.3 - Percentagem de cada matéria-prima para produção de hidrogénio em estações de reabastecimento

	H ₂ Gasoso	H ₂ Líquido
Gás Natural	100,0%	100,0%
Electrólise	0,0%	0,0%

2.4 - Opções de sequestro de CO₂ na produção de H₂ em plantas centralizadas

	H ₂ Gasoso	H ₂ Líquido
Gás Natural	1	1
Carvão	1	1
Biomassa	1	1

1 - Sem sequestro de CO₂
2 - Com sequestro de CO₂

2.5 - Selecção dos tipos de plantas de produção de hidrogénio

	GN como matéria-prima	Carvão como matéria-prima	Biomassa como matéria-prima
Planta centralizada: hidrogénio gasoso	0	0	0
Estação de reabastecimento: hidrogénio gasoso	0	0	0
Planta centralizada: hidrogénio líquido	0	0	0
Estação de reabastecimento: hidrogénio líquido	0	0	0

0 - Sem co-produção
1 - Co-produção de vapor
2 - Co-produção de electricidade

2.6 - Percentagem de Árvores no total da Biomassa para produção de hidrogénio em plantas centralizadas

	Hidrogénio gasoso	Hidrogénio líquido
	0,0%	0,0%

Figura 41 – Dados relativos à produção de H₂.

Inicialmente é efectuada a escolha por parte do utilizador do local de produção de H_2 . Esta selecção, conjugada com a posterior selecção da percentagem de cada matéria-prima em cada local, vai originar na folha “Hidrogénio” a fracção contribuinte de cada matéria-prima para a produção de $G.H_2$ e $L.H_2$, quer em estações de reabastecimento quer em plantas centralizadas.

O modelo MACV2 H_2 permite a selecção de várias formas de produção de H_2 . A reformação a vapor do GN em plantas centralizadas e em estações de reabastecimento, a electrólise em estações de reabastecimento tendo em conta o sistema electroprodutor Português, a energia solar fotovoltaica em plantas centralizadas, a energia eólica em plantas centralizadas e a gaseificação da biomassa e do carvão em plantas centralizadas são as formas de produção de $G.H_2$ e $L.H_2$ permitidas no referido modelo.

Contudo a produção de H_2 em plantas centralizadas a partir de GN, carvão ou biomassa pode incorporar a tecnologia de CCS. O utilizador pode indicar a presença ou não da CCS através do ponto 2.4 (Figura 41). A manipulação destas variáveis vai influenciar directamente a folha de cálculo “Hidrogénio”. No caso de o utilizador indicar que o método de produção de H_2 inclui a CCS, as variáveis da folha “Hidrogénio” serão alteradas e será recuperado 90% do CO_2 emitido na produção do H_2 .

Ainda relativo à produção de H_2 o modelo permite a selecção do tipo de planta, ou seja, se a produção de $G.H_2$ ou de $L.H_2$ é efectuada sem co-produção, com co-produção de vapor ou com co-produção de electricidade, quer em plantas centralizadas quer em estações de reabastecimento. No caso da biomassa e do carvão em estações de reabastecimento quer no caso do $G.H_2$ ou do $L.H_2$ não há selecção disponível do tipo de planta por parte do modelo, uma vez tanto a biomassa como o carvão apenas permitem a produção de H_2 em plantas centralizadas. A manipulação destes valores vai influenciar directamente a folha “Hidrogénio”, podendo ser apresentados nesta os valores da electricidade ou vapor exportados consoante a selecção efectuada.

O último sub-ponto da produção de H_2 corresponde à selecção da fracção de árvores no total da biomassa utilizada em plantas centralizadas. Este facto é importante uma vez que tanto o PCI com o PCS da biomassa constituída por árvores são diferentes dos da biomassa herbácea. A selecção da fracção de árvores permite determinar as propriedades da biomassa utilizada.

No terceiro ponto refere-se aos dados da simulação, ou seja, neste ponto são requeridas as condições da simulação a efectuar. Numa fase inicial o utilizador selecciona se pretende efectuar a simulação com veículos ligeiros de passageiros, pesados de passageiros, pesados de mercadorias ou motociclos com cilindrada inferior a 50 cm^3 (Figura 42). A escolha do tipo de veículo terá influência directa na folha “Resultados” alterando desta forma os valores apresentados.

3. Dados da simulação

3.1 - Selecção do tipo de veículos a simular
0 0 - Veículos ligeiros de passageiros
 1 - Veículos pesados de passageiros
 2 - Veículos pesados de mercadorias
 3 - Motociclos cc < 50 cm³

3.2 - Velocidade média da viagem a simular
110 km/h

3.3 - Norma dos veículos a simular

Gasolina	*	Pesados (gasóleo)	*	Motociclos < 50 cm³
8 0 - PRE ECE 3 - ECE 15-03 6 - Euro 2	*	3 0 - 80ties 3 - Euro 3	*	3 0 - Convencional 3 - Euro 3
1 - ECE 15-00/01 4 - ECE 15-04 7 - Euro 3	*	1 - Euro 1 4 - Euro 4	*	1 - Euro 1
2 - ECE 15-02 5 - Euro 1 8 - Euro 4	*	2 - Euro 2 5 - Euro 5	*	2 - Euro 2

3.4 - Selecção do tipo de veículo pesado

Pesado de mercadorias	*	Pesado de passageiros	*	Carga do veículo pesado
2 0 - <=7.5t 3 - >14-20t 6 - >28-32t	*	2 0 - Autocarro <=18t 3 - Autocarro Urbano 15t-18t	*	2 0 - 0%
1 - >7.5-12t 4 - >20-26t 7 - >32t	*	1 - Autocarro >18t 4 - Autocarro Articulado >18t	*	1 - 50%
2 - >12-14t 5 - >26-28t	*	2 - Autocarro Urbano <=15t	*	2 - 100%

3.5 - Cilindrada do veículo ligeiro
1 0 - < 1.4l
 1 - 1.4l - 2.0l
 2 - > 2.0l

3.6 - Fração urbana no total da simulação
2%

3.7 - Distância de um percurso a simular
310 km

Figura 42 – Dados relativos à simulação a efectuar.

Nesta fase o utilizador tem a possibilidade de introduzir a velocidade média em quilómetros por hora, dos veículos seleccionados na simulação. O valor de velocidade média introduzido vai influenciar directamente a folha “Veículos”, alterando desta forma os valores do consumo e das emissões dos veículos presentes no modelo. De salientar o facto de que o valor de velocidade introduzido terá que estar compreendido entre 10 e 130 km/h para o caso dos veículos ligeiros de passageiros, um valor introduzido inferior a 10 km/h ou superior a 130 km/h gera uma mensagem de erro com letras a vermelho a alertar o utilizador para introduzir um valor de velocidade dentro dos parâmetros requeridos. No caso dos veículos pesados, quer estes sejam pesados de passageiros ou de mercadorias, a gama de velocidades possíveis de serem introduzidas no modelo varia entre 6 e 100 km/h. A introdução de valores abaixo de 6 km/h ou acima de 100 km/h apresentarão um erro a letras vermelhas. Ao seleccionar os motociclos com cilindrada inferior a 50 cm³, o utilizador poderá efectuar uma simulação apenas em meio urbano. A introdução de velocidade neste caso não afectará a simulação, uma vez que ao seleccionar os motociclos o modelo considera logo a simulação em ambiente urbano. Estas restrições devem-se às características das equações utilizadas para determinação dos consumos e emissões dos veículos em questão. A origem das equações bem como as suas características serão explicadas posteriormente na secção veículos (4.5.16).

De seguida é possível seleccionar a norma dos veículos (Figura 42). Para os veículos ligeiros de passageiros a gasolina a selecção pode ser efectuada entre as nove normas disponíveis, ou seja, ao introduzir o valor 0 o utilizador selecciona a norma PRE ECE e com o valor 8 a norma EURO 4. O utilizador ao seleccionar veículos ligeiros de passageiros, o modelo considera que estes são por base a gasolina, podendo posteriormente o utilizador seleccionar a norma do veículo. Para os veículos pesados a

gasóleo, quer estes sejam de mercadorias ou de passageiros, a selecção pode ser efectuada entre as seis normas disponíveis. Nos motociclos com cilindrada inferior a 50 cm³, o utilizador pode optar entre quatro normas disponíveis no modelo, que vão desde a norma convencional, com a introdução do valor 0, à norma EURO III com a introdução do valor 3. Na selecção da norma para qualquer um dos veículos, a introdução de um valor fora da gama indicada no modelo MACV2H₂, gera um erro com letras vermelhas, alertando o utilizador para que este introduza um valor dentro dos disponíveis no modelo.

A selecção da norma por parte o utilizador juntamente com a posterior selecção da tara do veículo, no caso de este ser um pesado, ou de cilindrada no caso de ser ligeiro de passageiros a gasolina, o modelo adequa as emissões e os consumos ao tipo de veículo seleccionado. As referidas alterações fazem-se sentir na folha “Veículos”. Relativamente aos veículos pesados o utilizador pode ainda seleccionar a carga do veículo, entre 0%, 50% e 100% introduzindo os valores 0, 1 e 2 respectivamente.

A selecção da fracção urbana está relacionada com a fracção do percurso total efectuada pelos veículos em zona urbana. O valor introduzido nesta célula permite que o modelo determina as emissões urbanas por parte dos veículos seleccionados, tendo este influência directa na folha “Resultados”, alterando deste modo os valores das emissões urbanas na operação dos veículos.

Por fim se o utilizador pretender simular um percurso, poderá introduzir a distância total (km) do percurso a simular. Após a selecção o utilizador poderá consultar a folha “Percurso” onde serão apresentados os resultados WTW para o valor da distância introduzido. Esta célula comunica unicamente com a folha de cálculo “Percurso”.

O quarto ponto da presente folha de cálculo refere-se ao transporte quer de matérias-primas quer de combustíveis. O modelo possibilita o transporte rodoviário, ferroviário, marítimo e o transporte em gasodutos de matérias-primas/combustíveis.

Para o transporte rodoviário de matérias-primas/combustíveis o utilizador pode seleccionar para além da velocidade média do camião de transporte, a norma, a tara e a carga do pesado de mercadorias quer na viagem de ida quer na viagem de retorno (Figura 43). O utilizador ao seleccionar os dados referidos, indica ao modelo as características do camião de transporte. Este por sua vez altera os valores dos factores de emissão do camião de transporte de acordo com os dados introduzidos. A alteração das características dos pesados de transporte influencia directamente a folha “FE”, alterando nesta os factores de emissão dos camiões de transporte de matérias-primas/combustíveis. A velocidade dos camiões de transporte, tal como acontece com a simulação de pesados, está limitada à gama entre 6 e 100 km/h, a introdução de valores acima ou abaixo dos valores indicados vai gerar um erro de forma a alertar o utilizador. No caso da norma, da tara e da carga, a introdução de valores acima ou abaixo dos indicados pelo modelo (Figura 43) também vão alertar o utilizador com um erro com letras a vermelho.

4. Dados do transporte de matérias-primas/combustíveis

4.1 - Velocidade dos camiões de transporte
 50 km/h

4.2 - Tara dos camiões de transporte
 8 0 - <=7.5t 3 - >14-20t 6 - >28-32t
 1 - >7.5-12t 4 - >20-26t 7 - >32t
 2 - >12-14t 5 - >26-28t

ERRO: Insira o valor correcto a.s.f

4.3 - Norma dos camiões de transporte
 4 0 - 80ties 3 - Euro 3
 1 - Euro 1 4 - Euro 4
 2 - Euro 2 5 - Euro 5

4.4 - Factor de carga na viagem de transporte de pesado de mercadorias

Viagem de ida		Viagem de retorno	
2	0 - 0%	0	0 - 0%
	1 - 50%		1 - 50%
	2 - 100%		2 - 100%

4.5 - Potência do comboio de transporte de combustíveis/matérias-primas
 600 kW

4.6 - Factor de carga na viagem de origem ao destino com petroleiro ou navio

Viagem de ida		Viagem de retorno	
80%		60%	

4.7 - Velocidade média da viagem de ida e de retorno dos navios e petroleiros

Petroleiro	Navio
30 km/h	8 km/h

Figura 43 – Dados relativos ao transporte de matérias-primas/combustíveis.

Relativamente ao comboio para transporte de matérias-primas/combustíveis, o modelo apresenta uma célula para introdução da potência do comboio (kW). O utilizador ao introduzir o valor da potência vai proporcionar que o modelo seleccione os factores de emissão para o comboio com a potência indicada. As alterações são efectuadas directamente na folha “FE” e na intensidade energética do comboio presente na folha “Transporte”. De salientar o facto de que se o utilizador introduzir um valor inferior a 130 kW, o modelo gera uma mensagem de erro informando com letras vermelhas que o utilizador deverá introduzir um valor superior a 130 kW. A imposição por parte do modelo de um valor igual ou superior a 130 kW está relacionada com a fonte dos factores de emissão do comboio, que será mencionada posteriormente na secção FE (4.5.4).

No transporte marítimo é possível seleccionar na presente folha de cálculo a velocidade média e o factor de carga na viagem de ida e na de retorno dos petroleiros e dos navios. O valor da velocidade média dos petroleiros e dos navios têm influência na intensidade energética destes, presente na folha “Transporte”. Tal como a velocidade média dos petroleiros e dos navios, o factor de carga da viagem de ida e de retorno tem influência directa na folha “Transporte”.

4.5.3. Combustíveis

A folha de cálculo “Combustíveis” encontra-se decomposta em três pontos principais. No primeiro ponto são abordadas as propriedades dos combustíveis gasosos, líquidos e

sólidos. As propriedades referidas neste ponto são o PCI, o PCS, a massa volúmica para o caso dos combustíveis líquidos e gasosos, a fracção de carbono em percentagem e a fracção de enxofre em partes por milhão, conforme apresentado nos Quadros 8 a 10.

Quadro 8 – Propriedades dos combustíveis líquidos [71].

	PCI [MJ/m ³]	PCS [MJ/m ³]	Massa Volúmica [kg/m ³]	Fracção de Carbono [%]	Fracção de Enxofre [ppm]
Crude	36141,3	38560,6	846,7	85,2	9150
Etanol	21274,5	23560,0	789,4	52,2	1
Gás Natural	23324,8	25098,5			0
Gasóleo	35801,3	38290,2	836,6	86,5	10
Gasolina	32356,3	34655,7	744,7	86,3	10
GPL	20825,8	23640,8	428,2	75,0	0
Hidrogénio	8500,9	10039,4	70,8	0,0	0
Fuel Óleo	39118,8	41838,3	991,2	86,8	5000
Fuel Óleo pesado	39118,8	41838,3	991,2	86,8	28000

Quadro 9 – Propriedades dos combustíveis gasosos [71].

	PCI [MJ/m ³]	PCS [MJ/m ³]	Massa Volúmica [kg/m ³]	Fracção de Carbono [%]	Fracção de Enxofre [ppm]
Gás Natural	36,6	40,6	0,78	72,4	6
Hidrogénio	10,8	12,8	0,09	0,0	0
Dióxido de Carbono			1,98	27,3	0

Quadro 10 – Propriedades dos combustíveis líquidos [71].

	PCI [MJ/m ³]	PCS [MJ/m ³]	Fracção de Carbono [%]	Fracção de Enxofre [ppm]
Biomassa	17736,6	18677,9	51,7	0
Carvão	20622,5	21743,3	63,7	11100
Carvão betuminoso	23697,3	24736,8	75,5	11800
Pet Coke	26766,9	28402,2	79,9	68000
Biomassa: Herbácea	15612,3	16440,8	42,6	0
Biomassa: Árvores	17736,6	18677,8	51,7	0

O modelo MACV2H₂ efectua a selecção entre o PCI e o PCS consoante os dados introduzidos pelo utilizador na folha de cálculo “Dados de Entrada”, ou seja, no ponto um da referida folha de cálculo o utilizador selecciona se quer efectuar a simulação com o PCI ou com PCS, proporcionando que o modelo disponibilize na folha de cálculo “Combustíveis” o poder calorífico requerido pelo utilizador. Os valores do Quadro 8 ao 10 foram retirados do modelo GREET 1.8c efectuando as respectivas alterações de unidades. Em excepção encontra-se a fracção de enxofre presente na gasolina e no gasóleo de 10ppm, valor retirado da directiva da qualidade dos combustíveis vigente em Portugal (Directiva 2003/17/CE) [72].

As propriedades registadas são as mais relevantes para o cálculo das emissões de poluentes e do consumo energético.

O poder calorífico corresponde à quantidade de energia libertada numa combustão por unidade de volume ou massa. Como indicado nos três quadros acima existem dois poderes caloríficos, o PCI e o PCS. O PCI representa a quantidade de energia libertada sob a forma de calor por unidade de volume ou massa. No PCS, acresce ao PCI a quantidade de energia dispendida para vaporizar a água formada na reacção de oxidação. Deste modo verifica-se que quanto maior o poder calorífico do combustível, maior é a quantidade de energia libertada, ou por outras palavras, menor será a quantidade de combustível necessária para libertar uma determinada energia.

A fracção de enxofre é também um facto importante, essencialmente para as emissões de poluentes. A fracção de enxofre determina a quantidade do elemento enxofre presente no combustível. Este facto é de extrema importância na formação das chuvas ácidas, uma vez que após a combustão há produção de dióxido de enxofre (SO_2). O SO_2 que combinado com a água dá origem às chuvas ácidas.

Por fim a fracção de carbono que corresponde à quantidade de carbono presente no combustível. Esta propriedade tem grande influência no CO_2 e no CO libertado, uma vez que quanto maior o teor de carbono de um combustível maior será a quantidade de CO_2 e CO libertados após combustão.

No segundo ponto da presente folha de cálculo são apresentados os factores de aquecimento global dos gases resultantes da combustão (Quadro 11).

Quadro 11 – Factores de aquecimento global [73].

Factor de aquecimento global	
CO_2	1
CH_4	25
N_2O	298
VOC	0
CO	0
NO_2	0

Os factores de aquecimento global apresentados relacionam os gases causadores do aquecimento global com o CO_2 cujo factor é 1. O horizonte de tempo considerado para os valores apresentados é de 100 anos. Deste modo, num horizonte de 100 anos, o CH_4 e o N_2O contribuem respectivamente 25 e 298 vezes mais para o aquecimento global que o CO_2 . Sendo assim, com estes factores de aquecimento global, o modelo MACV2H₂ pode calcular a quantidade de GEE expressa em massa de CO_2 equivalente.

Por fim o ultimo ponto da folha de cálculo “Combustíveis” refere-se às fracções de carbono e de enxofre dos poluentes. Neste ponto é também apresentada a massa atómica de alguns elementos (Quadro 12).

Quadro 12 – Massa atómica de alguns elementos [74].

Massa atómica	
C	12,011
H	1,008
O	15,999
S	32,066
N	14,007

Com a massa atómica dos elementos presentes no Quadro 12, o modelo calcula a fracção de carbono e de enxofre presente nos poluentes, valores que podem ser observados no Quadro 13.

Quadro 13 – Fracções de carbono e enxofre dos poluentes.

Carbono em CH₄	0,749
Carbono em CO	0,429
Carbono em CO₂	0,273
Carbono em VOC	0,850
Enxofre em SO₂	0,501

4.5.4. FE

Na folha de cálculo “FE” encontram-se os factores de emissão para as tecnologias de combustão estacionária e para o transporte de matérias-primas e/ou combustíveis. Os referidos factores de emissão são apresentados em g por kWh. A folha de cálculo em questão encontra-se dividida em dois pontos principais

Num ponto inicial são abordados os factores de emissão das tecnologias de combustão estacionária utilizados no modelo MACV2H₂. Estes factores são importantes para o cálculo das emissões de poluentes em alguns das folhas de cálculo subsequentes, nomeadamente, “Petróleo”, “Gás Natural”, “Carvão”, “Etanol”, “Electricidade”, “Hidrogénio” e “Fertilizantes”. Nos Quadros 14 a 16 é possível observar os factores de emissão para as tecnologias estacionárias consideradas no modelo MACV2H₂.

Quadro 14 – Factores de emissão para as tecnologias estacionárias (1/3) [71, 75].

	Gás Natural					Fuel Óleo	Gasolina
	Turbina* Simples	Turbina de ciclo combinado*	Motor* estacionário	GN queimado (petróleo)	Caldeira* Industrial	Caldeira* Industrial	Motor estacionário
VOC	0,008	0,024	0,028	0,009	0,009	0,023	0,355
CO	0,183	0,136	0,166	0,089	0,056	0,176	1,859
NO_x	0,245	0,204	0,204	0,167	0,143	0,390	1,636
PM	0,001	0,001	0,005	0,013	0,000	0,004	0,085
SO_x	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,251	0,004
CH₄	0,007	0,010	0,012	0,167	0,004	0,011	0,018
N₂O	0,004	0,008	0,005	0,004	0,005	0,007	0,008
CO₂	184,121	178,997	181,310	202,150	181,496	268,026	258,180

Quadro 15 – Factores de emissão para as tecnologias estacionárias (2/3) [71, 75].

	Gasóleo				Carvão		GPL
	Caldeira Industrial	Motor * estacionário	Turbina	Tractor* agrícola	Caldeira* Industrial	Turbina IGCC	Caldeira*
VOC	0,004	0,021	0,005	0,016	0,008	0,005	0,033
CO	0,057	0,706	0,030	0,543	0,329	0,042	0,133
NO_x	0,281	3,258	0,449	2,715	0,526	0,150	0,074
PM	0,145	0,272	0,058	0,217	0,065	0,022	0,000
SO_x	0,027	0,237	0,027	0,158	0,319	0,150	0,000
CH₄	0,001	0,010	0,003	0,005	0,001	0,017	0,017
N₂O	0,001	0,010	0,007	0,005	0,174	0,017	0,003
CO₂	266,790	250,222	266,830	250,311	324,275	370,180	211,685

Quadro 16 – Factores de emissão para as tecnologias estacionárias (3/3) [71, 75].

	Biomassa: Árvores		Biomassa: herbácea		Hidrogénio	Pet Coque
	Caldeira Industrial	Turbina de gaseificação	Caldeira Industrial	Turbina de gaseificação	Caldeira * Industrial	Caldeira* Industrial
VOC	0,018	0,004	0,018	0,004	0,000	0,061
CO	0,262	0,036	0,262	0,036	0,000	0,184
NO_x	0,375	0,031	0,375	0,031	0,124	0,490
PM	0,043	0,019	0,043	0,019	0,000	0,126
SO_x	0,014	0,129	0,014	0,129	0,000	2,489
CH₄	0,013	0,013	0,013	0,013	0,000	0,031
N₂O	0,038	0,038	0,038	0,038	0,000	0,012
CO₂	383,999	384,398	359,430	359,829	0,000	319,955

Os factores de emissão das tecnologias estacionárias assinaladas com um asterisco (*) foram obtidos por recurso ao modelo GEMIS, utilizando sempre que possível dados para as tecnologias estacionárias de Portugal. No entanto o GEMIS não contém todas estas tecnologias para Portugal, sendo que, neste caso recorreu-se a factores de emissão característicos para a UE, ou em último caso, países pertencentes a esta. Devido à dificuldade em obter fontes alternativas, para as tecnologias estacionárias que não se encontram assinaladas com asterisco nos Quadros 14 a 16, mantiveram-se os factores de emissão apresentados no GREET 1.8c com a respectiva conversão de unidades.

O segundo ponto da presente folha de cálculo contém os factores de emissão, tendo como base os combustíveis convencionais, para os meios de transporte de matérias-primas e/ou combustíveis presentes no MACV2H₂. O modelo permite o transporte de matérias-primas e/ou combustíveis por petroleiro, navio, comboio, gasoduto e por camião de transporte de mercadorias (pesado de mercadorias). Relativamente ao gasoduto, os factores de emissão encontram-se no Quadro 17. Como referenciado, os factores de emissão para o gasoduto a GN foram obtidos no modelo GEMIS 4.5, para Portugal em 2010.

Quadro 17 – Factores de emissão para o gasoduto a GN [75].

	Factor de emissão [g/kWh]
VOC	0,045
CO	0,302
NO_x	1,058
PM	0,015
SO_x	0,002
CH₄	0,015
N₂O	0,009
CO₂	198,545

No caso dos comboios de transporte os factores de emissão variam consoante a potência deste. No quadro seguinte pode-se observar os factores de emissão para as várias potências dos comboios de transporte, de acordo com a Agência Europeia do Ambiente.

Quadro 18 – Factores de emissão para o comboio a gasóleo [76].

	Factores de emissão [g/kWh]		
	130 – 560 [kW]	560 – 2000 [kW]	>2000 [kW]
VOC	0,40	0,40	0,40
CO	2,80	2,80	2,80
NO_x	3,50	6,00	7,40
PM	0,18	0,18	0,18
SO_x	0,00	0,00	0,00
CH₄	0,04	0,04	0,04
N₂O	0,35	0,35	0,35
CO₂	260,89	260,89	260,89

A introdução por parte do utilizador da potência do comboio na folha de cálculo “Dados de Entrada”, vai permitir que o modelo selecione os factores de emissão de acordo com a potência introduzida e os valores do Quadro 18. Posteriormente o modelo calcula as emissões referentes ao transporte de mercadorias/combustíveis em comboios, processo que será abordado mais à frente na secção Transporte (4.5.15).

Para os veículos pesados de mercadorias, o modelo considera várias normas, taras e cargas. Relativamente a normas o utilizador pode seleccionar na folha de cálculo “Dados de Entrada” entre a norma convencional à norma EURO 4. Na mesma folha de cálculo o utilizador também selecciona a tara, podendo esta ser desde inferior ou igual a 7,5 toneladas a superior a 32 toneladas. Estas características conjugadas com a carga do veículo que pode ser 0%, 50% ou 100%, vão permitir que o modelo selecione entre os vários factores de emissão para veículos pesados disponíveis na folha “FE”, os que correspondem às exigências introduzidas pelo utilizador. As equações sobre as quais se obteve os factores de emissão para estes veículos encontram-se no Anexo, do Quadro A 1 ao A 15.

No caso dos petroleiros e navios de transporte (quer de mercadorias quer de combustíveis) mantiveram-se os valores apresentados no modelo GREET com a respectiva conversão de unidades. No quadro seguinte podem ser observados os factores

de emissão dos navios e petroleiros de transporte considerados no modelo MACV2H₂, que possuem como combustível base fuel óleo.

Quadro 19 – Factores de emissão para os petroleiros e os navios de transporte a fuel óleo [71].

	Petroleiro: factores de emissão [g/kWh]	Navio: factores de emissão [g/kWh]
VOC	0,219	0,219
CO	0,675	0,675
NO_x	7,936	5,199
PM	0,611	0,100
SO_x	5,103	0,911
CH₄	0,005	0,000
N₂O	0,007	0,007
CO₂	289,151	288,365

4.5.5. Petróleo

A folha de cálculo petróleo encontra-se dividida em sete pontos principais.

Entre os principais pontos são efectuados os cálculos não só para extracção e refinamento do petróleo, como a produção de combustíveis derivados do petróleo. Os combustíveis considerados são o fuel óleo, a gasolina, o gasóleo e o GPL. Existem no entanto dois factos a salientar. Um deles consiste no facto de o fuel óleo não ser considerado combustível automóvel, no entanto considerou-se a sua produção pois este é utilizado nos navios e petroleiros de transporte, tal como é essencial para o cálculo das emissões e consumos energéticos na produção de electricidade. Em segundo lugar, é importante referir que a produção de GPL não é concluída nesta folha de cálculo. Na presente folha de cálculo são efectuados os consumos energéticos e emissões de poluentes para produção de GPL exclusivamente com Crude.

O primeiro ponto dedica-se exclusivamente à selecção da fracção de GN utilizada para produção de GPL, ou seja, neste ponto o utilizador introduz a percentagem entre o crude e o GN utilizada para produção de GPL. Este ponto permite a conjugação dos valores de produção de GPL exclusivamente por GN presentes na folha de cálculo “Gás Natural” com os presentes nesta folha de cálculo. Deste modo obtêm-se os valores do consumo energético e de emissão de poluentes na produção de GPL com as fracções introduzidas pelo utilizador. Na figura seguinte pode-se observar o excerto do modelo MACV2H₂ que contém este ponto.

1. Peso na produção de GPL		
	Crude	GN
Produção de GPL	40%	60%

Figura 44 – Primeiro ponto da folha de cálculo “Petróleo”, que apresenta o peso entre crude e GN na produção de GPL.

A introdução, por parte do utilizador, de um valor cuja soma entre a fracção de crude e de GN na produção de GPL seja diferente de 100%, gera um erro alertando o utilizador para introduzir valores cuja soma represente 100%.

No segundo ponto é apresentado o peso de cada uma das tecnologias estacionárias, cujos factores de emissão se encontram especificados na folha de cálculo descrita anteriormente. Os pesos das tecnologias são apresentados para a extracção do crude e para a produção dos derivados de petróleo incorporados no modelo MACV2H₂. No quadro seguinte encontram-se precisamente os pesos relativos das tecnologias estacionárias. Neste caso, devido ao desconhecimento de fontes alternativas fidedignas, manteve-se os valores apresentados no GREET 1.8c.

Quadro 20 – Peso relativos das tecnologias estacionárias na produção de combustíveis [71].

	Extracção Petróleo	Refinação Fuel óleo	Produção Gasolina	Produção Gasóleo	Produção GPL
Caldeira Industrial a Fuel óleo	100%	100%	100%	100%	100%
Caldeira Industrial a Gasóleo	25%	33%	33%	33%	33%
Motor estacionário a Gasóleo	50%	33%	33%	33%	33%
Turbina a Gasóleo	25%	34%	34%	34%	34%
Motor a GN	50%	0%	0%	0%	0%
Turbina a GN	0%	25%	25%	25%	25%
Caldeira industrial a GN	50%	75%	75%	75%	75%
Caldeira industrial a Carvão	0%	100%	100%	100%	100%

O ponto seguinte encontra-se reservado à eficiência global dos processos de produção de combustíveis bem como às emissões urbanas. O valor de eficiência global é de extrema importância para o cálculo dos consumos energéticos dos processos de produção de combustíveis derivados do petróleo bem como da sua extracção. Quanto menor a eficiência global, maior será a energia dispendida no processo.

Quadro 21 – Valores da eficiência global e emissões urbanas para o petróleo e seus derivados [71, 75, 77].

	Extracção Petróleo	Refinação Fuel óleo	Produção Gasolina	Produção Gasóleo	Produção GPL
Eficiência global	97,6%	95,0%	92,6%	90,9%	92,9%
Emissões urbanas	2,0%	65,0%	65,0%	65,0%	65,0%

No caso das emissões urbanas foram mantidos os valores apresentados pelo modelo GREET 1.8c. Os valores da eficiência global dividem-se entre duas fontes, ou seja, a eficiência global do processo de refinação de fuel óleo e de produção de GPL foram obtidos por intermédio do modelo GEMIS 4.5. No caso do fuel óleo o valor apresentado no Quadro 21, corresponde ao valor definido no GEMIS como eficiência global para a

OPEP. A eficiência global da produção de GPL é o valor apresentado pelo GEMIS como valor de referência para o processo. Os restantes valores da eficiência global para os restantes processos apresentados no Quadro 21 obtiveram-se por análise de um estudo WTW realizado pelo *Joint Research Centre* [77].

Posteriormente, no ponto quatro da presente folha de cálculo, são abordados os pesos relativos de cada um dos combustíveis para os processos de extracção de petróleo, refinação de fuel óleo e refinação de gasolina, gasóleo e GPL. Os referidos pesos relativos podem ser observados no quadro seguinte.

Quadro 22 – Peso relativo dos combustíveis nos processos de extracção de petróleo e produção de seus derivados [71].

	Extracção Petróleo	Refinação Fuel óleo	Produção Gasolina	Produção Gasóleo	Produção GPL
Crude	1%	0%	0%	0%	0%
Fuel óleo	1%	3%	3%	3%	3%
Gasóleo	15%	0%	0%	0%	0%
Gasolina	2%	0%	0%	0%	0%
Gás Natural	62%	30%	30%	30%	30%
Carvão	0%	13%	13%	13%	13%
Electricidade	19%	4%	4%	4%	4%
Hidrogénio	0%	0%	0%	0%	0%
Gases de processo	0%	50%	50%	50%	50%

Os pontos cinco e seis correspondem ao cálculo dos consumos energéticos e emissões de poluentes associados à extracção e transporte de petróleo, à refinação e transporte do fuel óleo, bem como à produção e transporte dos derivados de petróleo considerados no modelo MACV2H₂.

Por fim o último ponto não é mais que um sumário. Ou seja, neste ponto são apresentados os consumos energéticos e emissões de poluentes do crude como matéria-prima e de cada um dos combustíveis referidos acima como presentes nesta folha de cálculo. De salientar o facto de o consumo energético ser apresentado em J por kWh_{transformado}, ou seja, é expresso em unidades de energia consumida por unidade de energia de combustível transformado. As emissões de poluentes, quer estes sejam os poluentes totais ou os poluentes emitidos em zonas urbanas, são apresentadas em gramas emitidas por unidade de energia de combustível transformado, isto é, g/kWh_{transformado}.

O consumo energético está fortemente relacionado com os valores dos Quadros 20 ao 22. Como referido anteriormente no Quadro 21 os valores que afectam o consumo energético são os da eficiência global. Para o caso das emissões de poluentes, para além dos factores de emissão das tecnologias estacionárias presentes na folha de cálculo “FE”, são importantes os valores dos Quadros 20 ao 22.

4.5.6. Gás Natural

A folha de cálculo “Gás Natural” é bastante semelhante com a folha de cálculo explicada anteriormente. Esta folha de cálculo, tal como a folha “Petróleo” é composta por sete pontos principais. Contudo na presente folha é apenas abordado o processo de extracção e processamento do GN bem como o processo de produção de GPL. É nesta folha de cálculo que são apresentados os consumos energéticos finais da produção de GPL, produzido com as respectivas fracções de crude e GN, introduzidas pelo utilizador. O primeiro ponto da folha de cálculo em questão é relativo às referidas fracções, no entanto, o utilizador nesta folha não efectua a introdução das fracções de matéria-prima que pretende para produção de GPL, entre crude e GN. A introdução por parte do utilizador é efectuada na folha “Petróleo”, posteriormente essa folha de cálculo comunica com a presente folha.

O ponto seguinte corresponde aos pesos relativos de cada uma das tecnologias de combustão em cada combustível utilizado nos processos de extracção e processamento do GN e produção do GPL.

Quadro 23 – Pesos relativos das tecnologias estacionárias na extracção e processamento do GN e produção de GPL [71].

	Gás Natural		Produção GPL
	Extracção	Processamento	
Caldeira Industrial a Fuel óleo	100%	100%	100%
Caldeira Industrial a Gasóleo	25%	33%	33%
Motor estacionário a Gasóleo	50%	33%	33%
Turbina a Gasóleo	25%	34%	34%
Motor a GN	50%	0%	0%
Turbina a GN	0%	50%	50%
Caldeira industrial a GN	50%	50%	50%
Turbina a Carvão IGCC	0%	0%	0%

De seguida tal como na folha de cálculo anterior, o modelo apresenta os valores de eficiência global e emissões urbanas. Também nesta situação foram mantidos os valores das emissões urbanas considerados no modelo GREET 1.8c. O valor da eficiência global do processo de produção de GPL foi obtido com recurso ao modelo GEMIS 4.5, sendo o valor apresentado um valor referido como genérico para o processo. Por fim os valores da eficiência global para extracção e processamento do GN obtiveram-se por análise de um estudo WTW realizado pelo *Joint Research Centre* [77].

Quadro 24 – Valores da eficiência global e emissões urbanas para GN e GPL [71, 75, 77].

	Gás Natural		Produção GPL
	Extracção	Processamento	
Eficiência global	97,7%	97,7%	92,9%
Emissões urbanas	1,0%	1,0%	65,0%

Há semelhança da folha de cálculo anterior, no quarto ponto, são abordados os pesos relativos de cada um dos combustíveis para os processos de extracção e processamento do GN, assim como de produção de GPL. Os pesos relativos dos combustíveis que integram a folha de cálculo “Gás Natural” podem ser observados no Quadro 25.

Quadro 25 – Peso relativo dos combustíveis nos processos de extracção e processamento de GN e produção de GPL [71].

	Gás Natural		Produção GPL
	Extracção	Processamento	
Fuel óleo	1%	0%	0%
Gasóleo	10%	1%	1%
Gasolina	1%	0%	0%
Gás Natural	76%	91%	96%
Carvão	0%	0%	0%
Hidrogénio	0%	0%	0%
Electricidade	1%	3%	3%

Os pontos cinco, seis e sete são em tudo semelhantes aos da folha de cálculo “Petróleo”, representando respectivamente o consumo energético, as emissões de poluentes e um sumário relativo ao consumo energético e emissões de poluentes. As unidades quer do consumo energético quer das emissões são as mesmas da folha de cálculo anterior.

4.5.7. Carvão

A folha de cálculo “carvão” incorpora os cálculos do consumo energético e emissões de poluentes do processo de extracção e processamento do carvão. O modelo considera o transporte do carvão para dois locais, sendo estes, as centrais eléctricas e as plantas centralizadas para produção de H₂. Esta folha de cálculo é semelhante às duas anteriores, no entanto a disposição dos conteúdos nos principais pontos não é a mesma, uma vez que só possui seis pontos principais.

Na fase inicial da folha de cálculo “Carvão” são especificados os pesos das tecnologias de combustão estacionária para cada um dos combustíveis utilizados no processo de extracção e processamento do carvão. O quadro seguinte contém o peso de cada uma das tecnologias de combustão estacionária no processo de extracção e processamento do carvão. Cada uma das fracções expressas no quadro seguinte conjugadas com os respectivos factores de emissão presentes na folha de cálculo “FE” dá origem às emissões de poluentes do processo de extracção e de processamento do carvão.

Quadro 26 – Pesos relativos das tecnologias estacionárias na extracção e processamento do carvão [71].

Extracção e processamento do Carvão	
Caldeira Industrial a Fuel óleo	100%
Caldeira Industrial a Gasóleo	33%
Motor estacionário a Gasóleo	33%
Turbina a Gasóleo	34%
Motor a GN	50%
Turbina a GN	0%
Caldeira industrial a GN	50%
Caldeira industrial a Carvão	100%

No ponto posterior são apresentados os valores de emissões urbanas e de eficiência global no processo de extracção e processamento do carvão. Estes valores, que podem ser observados no Quadro 27, são relevantes pois contribuem para o consumo energético e para as emissões de poluentes finais do carvão enquanto matéria-prima.

Quadro 27 – Valores da eficiência global e emissões urbanas para o carvão [71, 75].

Extracção e processamento do Carvão	
Eficiência Global	97%
Emissões Urbanas	0%

O valor da eficiência global dos processos de extracção e processamento do carvão presente no Quadro 27 é um valor genérico para os processos referidos e obteve-se por consulta do modelo GEMIS 4.5. No caso das emissões urbanas manteve-se o valor apresentado pelo modelo GREET 1.8c.

Para o cálculo dos consumos energéticos inerentes ao processo de extracção e processamento do carvão são essenciais os valores presentes no ponto três da presente folha de cálculo, e que podem ser observados no Quadro 28. Os valores representam num total de 100%, a fracção de utilização de cada combustível nos processos de extracção e processamento do carvão. A conjugação destes valores com os factores de emissão das tecnologias de combustão estacionária e com o peso relativo das tecnologias de combustão estacionária na extracção e processamento do carvão dão origem às emissões de poluentes do carvão enquanto matéria-prima.

Quadro 28 – Peso relativo de cada um dos combustíveis nos processos de extracção e processamento do carvão [71].

Extracção e processamento do Carvão	
Fuel óleo	7%
Gasóleo	56%
Gasolina	3%
Gás Natural	1%
Carvão	9%
Electricidade	24%

Nos restantes pontos são apresentados respectivamente os consumos energéticos, as emissões de poluentes e um sumário dos consumos energéticos e emissões de poluentes. O consumo energético é apresentado em unidades de energia consumida por unidade de energia de combustível transformado ($\text{J/kWh}_{\text{transformado}}$). No entanto as emissões de poluentes são apresentadas em gramas emitidas por unidade de energia de combustível transformado ($\text{g/kWh}_{\text{transformado}}$). No último ponto, ou seja, no sumário das emissões de poluentes e consumos energéticos, os resultados são apresentados sob dois valores. Um dos valores corresponde ao carvão que vai ser utilizado em centrais eléctricas e o outro a carvão que vai ser utilizado para produção de H_2 em plantas centralizadas.

4.5.8. Etanol

A folha “Etanol” é importante essencialmente para o cálculo dos consumos energéticos e emissões de poluentes dos dois tipos de biomassa incluídos no modelo MACV2H₂ (biomassa herbácea e das árvores). Esses valores são importantes posteriormente para o cálculo do consumo energético e emissões na produção eléctrica, uma vez que 3,4% da produção de energia eléctrica nacional é efectuada a partir de biomassa (Quadro 31). Os valores dos consumos energéticos e emissões obtidos nesta folha de cálculo também vão ser essenciais para o cálculo do consumo de energia e emissões de poluentes na produção de hidrogénio por biomassa em plantas centralizadas. A presente folha de cálculo encontra-se decomposta em cinco pontos principais. Inicialmente são especificados os pesos relativos das tecnologias de combustão estacionária nos processos de produção de etanol a partir de biomassa (Quadro 29).

Quadro 29 – Peso relativo das tecnologias de combustão estacionária nos processos de produção de etanol a partir de biomassa [71].

	Criação de árvores		Biomassa herbácea	
	Agricultura	Produção de etanol	Agricultura	Produção de etanol
Caldeira Industrial a Fuel óleo	100%	100%	100%	100%
Caldeira Industrial a Gasóleo	0%	33%	0%	33%
Motor estacionário a Gasóleo	20%	33%	20%	33%
Turbina a Gasóleo	0%	34%	0%	34%
Tractor agrícola a Gasóleo	80%	0%	80%	0%
Motor a GN	100%	0%	100%	0%
Turbina a GN	0%	0%	0%	0%
Caldeira industrial a GN	0%	100%	0%	100%
Turbina IGCC a Carvão	100%	0%	100%	0%
Caldeira industrial a Biomassa	0%	0%	0%	0%
Turbina IGCC a biomassa	0%	0%	0%	0%

Os valores do Quadro 29, obtidos no GREET 1.8c, permitem obter, conjugados com os factores de emissão da folha de cálculo “FE” e o peso relativo de cada combustível no processo de agricultura (Quadro 30), as emissões de poluentes na fase da agricultura para a criação de árvores e de biomassa herbácea.

Quadro 30 – Peso relativo de cada um dos combustíveis no processo de agricultura da biomassa [71].

	Criação de árvores	Biomassa herbácea
Fuel óleo	0%	0%
Gasóleo	94,3%	92,8%
Gasolina	0%	0%
Gás Natural	0%	0%
Carvão	0%	0%
GPL	0%	0%
Biomassa	0%	0%
Electricidade	5,7%	7,2%

Os dados do Quadro 30 localizam-se no terceiro ponto da presente folha de cálculo do modelo MACV2H₂. No entanto no ponto anterior é pedido ao utilizador que seleccione o processo de produção de etanol para os tipos de biomassa incluídos no modelo. As células que permitem a introdução desses dados por parte do utilizador encontram-se representadas na figura seguinte.

Criação de Árvores	0	0 - Fermentação
Biomassa Herbácea	0	1 - Gaseificação

Figura 45 – Células de selecção do processo de produção de etanol para os tipos de biomassa incluídos no MACV2H₂.

Posteriormente o terceiro ponto para além do peso relativo de cada um dos combustíveis no processo de agricultura da biomassa possui o consumo energético dos processos de criação da biomassa e de produção do etanol, sendo que no quarto ponto estão representadas as emissões de poluentes para os processos referidos anteriormente. De salientar que na criação da biomassa são essenciais os fertilizantes e os pesticidas. Contudo o consumo energético e as emissões de poluentes deste são importados da folha de cálculo “Fertilizantes” e portanto serão explicados posteriormente na secção 4.5.13. O mesmo acontece com o transporte da biomassa que é importado da folha de cálculo “Transporte” e que será explicado de forma sucinta na secção 4.5.15.

O último ponto da presente folha de cálculo corresponde a um resumo dos consumos energéticos e das emissões de poluentes inerentes à criação dos tipos de biomassa incluídos no modelo e à produção de etanol. O consumo energético é expresso em unidades de energia consumida por unidade de energia de combustível transformado ($\text{J/kWh}_{\text{transformado}}$) e as emissões de poluentes são expressas em gramas por unidade de energia de combustível transformado ($\text{g/kWh}_{\text{transformado}}$).

4.5.9. Electricidade

Na folha de cálculo “Electricidade” são efectuados os cálculos dos consumos energéticos e emissões de poluentes inerentes à produção de electricidade em Portugal. Os dados desta folha são essenciais para vários processos de produção de combustíveis, nomeadamente a produção de hidrogénio por electrólise em estações de reabastecimento. A presente folha encontra-se dividida em sete pontos principais. Posteriormente o último ponto, que corresponde ao sumário das emissões de poluentes e do consumo energético, encontra-se dividido em três sub-pontos, representando individualmente o consumo de energia, as emissões totais e as emissões urbanas.

Inicialmente é apresentado o mix energético de geração de electricidade em Portugal. No quadro seguinte é apresentada a produção de energia eléctrica por fonte de energia, incluindo o peso relativo das diversas fontes na produção de energia eléctrica. Posteriormente no Quadro 32 são apresentadas as emissões urbanas. De salientar o facto de quer a energia eólica, quer o solar fotovoltaico, quer a secção “outros” não apresentarem valores de emissões urbanas no Quadro 32. Este facto deve-se a estas fontes de produção de energia eléctrica serem fontes de energia renovável. Estas não apresentam emissões no acto de produção de energia eléctrica. Contudo quer a produção dos painéis fotovoltaicos quer a produção das torres eólicas apresentam emissões. As emissões e consumos energéticos destes dois processos será abordada posteriormente nas secções 4.5.10 e 4.5.11. A secção “Outros” do quadro seguinte, engloba a produção de energia eléctrica por recurso a energia hídrica e energia geotérmica.

Quadro 31 – Peso relativo por fonte energética na produção de energia eléctrica em Portugal [4].

	[%]	[GWh]	[tep]
Petróleo	10,4	4870,0	1412,3
Gás Natural	28,1	13124,0	3806,0
Carvão	26,6	12398,0	3595,4
Biomassa	3,4	1588,0	460,5
Nuclear	0,0	0,0	0,0
Solar Fotovoltaico	0,1	24,0	7,0
Energia Eólica	8,6	4037,0	1170,7
Outros	22,8	10650,0	3088,5
Total	100,0	46691,0	13540,4

Segundo os dados da Agência Internacional da Energia para o ano de 2007, Portugal apresenta cerca de 35% de fontes de energia renovável para produção de energia eléctrica. Contudo ainda se verifica uma grande fatia da energia eléctrica nacional produzida por carvão, ou seja, mais de um quarto da totalidade de energia eléctrica produzida em Portugal é com recurso a carvão.

Quadro 32 – Valores das emissões urbanas para cada um dos combustíveis inerentes à produção eléctrica em Portugal [71].

Emissões Urbanas [%]	
Petróleo	39,0
Gás Natural	43,0
Carvão	16,0
Biomassa	0,0
Nuclear	11,0

Por análise dos dados apresentados pela Agência Internacional de Energia para o ano de 2007, verifica-se que as perdas na distribuição de electricidade em Portugal são de 6,8%. O terceiro ponto da presente folha de cálculo é reservado precisamente para a apresentação de perdas nacionais na distribuição da energia eléctrica.

No entanto, antes das perdas na distribuição da energia eléctrica em Portugal, o modelo apresenta no ponto dois, o peso e a eficiência das tecnologias de combustão estacionária inerentes à geração de electricidade. Este ponto é importante, pois os valores presentes no Quadro 33 conjugados com os factores de emissão das tecnologias de combustão estacionária presentes na folha de cálculo “FE” e com o peso relativo por fonte energética na produção de energia eléctrica (Quadro 31), dão origem aos factores de emissão na geração de electricidade, que podem ser observados no Quadro 34. De salientar que os factores de emissão de produção de energia eléctrica são expressos em gramas por unidade de energia eléctrica produzida ($\text{g/kWh}_{\text{produzido}}$).

Quadro 33 – Pesos relativos e eficiência das tecnologias de combustão estacionária na produção eléctrica [71].

Combustível	Equipamento	Peso relativo [%]	Eficiência [%]
Petróleo	Caldeira industrial	100	34,8
	Caldeira industrial	20	34,8
Gás Natural	Turbina simples	36	33,1
	Turbina de ciclo combinado	44	53,0
Carvão	Caldeira industrial	100	34,1
	Turbina IGCC	0	46,0
Biomassa	Caldeira industrial	100	32,1
	Turbina IGCC	0	40,0

Quadro 34 – Factores de emissão por unidade de energia eléctrica produzida.

	Factores de emissão totais	Factores de emissão urbanos
VOC	0,024	0,008
CO	0,433	0,103
NO_x	0,712	0,174
PM	0,057	0,009
SO_x	0,326	0,069
CH₄	0,011	
N₂O	0,145	
CO₂	499,602	

Os dados do Quadro 34 encontram-se no quarto ponto da presente folha de cálculo.

Os pontos cinco e seis correspondem respectivamente ao cálculo do consumo energético e emissões de poluentes. As emissões de poluentes são obtidas de acordo com os dados do Quadro 34 e com o factor de perdas na distribuição de electricidade em Portugal. Por fim no último ponto, como já foi referido anteriormente, é apresentado um resumo dos consumos energéticos e emissões de poluentes. O consumo de energia é expresso em unidade de energia consumida por unidade de energia eléctrica distribuída ($\text{J/kWh}_{\text{distribuído}}$) e as emissões de poluentes em gramas por unidade de energia eléctrica distribuída ($\text{g/kWh}_{\text{distribuído}}$).

4.5.10. Fotovoltaico

A presente folha de cálculo apresenta os valores dos consumos energéticos e emissões de poluentes na produção dos painéis solares fotovoltaicos com produção de electricidade por parte destes. Os painéis fotovoltaicos são uma fonte limpa na produção de energia, contudo a produção dos painéis possui emissões e consumos energéticos. Estes valores vão ter relevância não só na produção de electricidade como a produção de hidrogénio por painéis fotovoltaicos em plantas centralizadas. Os valores obtidos para os consumos energéticos e emissões de poluentes inerentes à produção dos painéis fotovoltaicos encontram-se nos Quadros 35 e 36, e foram obtidos por consulta do modelo GEMIS 4.5 para painéis policristalinos com caixilharia de alumínio na Alemanha em 2010.

Quadro 35 – Consumos energéticos na produção de painéis fotovoltaicos incluído na produção de electricidade por parte destes [75].

Consumo energético	
	[J/kWh]
Energia total	1603094,0
Combustíveis fósseis	1096732,8
Carvão	325191,6
Gás Natural	618300,0
Petróleo	153241,2

Quadro 36 – Emissões de poluentes na produção de painéis fotovoltaicos incluído na produção de electricidade por parte destes [75].

Emissões de poluentes	
	[g/kWh]
VOC	0,010
CO	2,125
NO_x	0,155
PM	0,068
SO_x	0,143
CH₄	0,263
N₂O	0,003
CO₂	98,072
GEE	105,423

4.5.11. Eólica

A presente folha de cálculo é semelhante à anterior. Contudo a folha de cálculo “Eólica” apresenta os cálculos para os consumos energéticos e emissões de poluentes na produção das torres eólicas. Os valores presentes nos Quadros 37 e 38 correspondem respectivamente aos consumos energéticos e emissões de poluentes inerentes à produção das torres eólicas com produção de electricidade por parte destas. De salientar mais uma vez, que apesar da produção de energia eléctrica por recurso ao vento ser limpa, a produção do equipamento, neste caso das torres eólicas, apresenta emissões que devem ser tidas em conta numa ACV. Os valores dos dois quadros seguintes foram obtidos por consulta do modelo GEMIS 4.5 e são importantes não só para a produção de electricidade como para a produção de hidrogénio por recurso a energia eólica em plantas centralizadas. Os valores são apresentados para um parque eólico de grandes dimensões na Alemanha em 2010. O modelo GEMIS apresenta valores para Portugal, contudo optou-se por seleccionar os da Alemanha uma vez que os valores apresentados para Portugal correspondem ao ano de 2000 e para um parque eólico médio.

Quadro 37 – Consumos energéticos na produção de torres eólicas incluído na produção de electricidade por parte destas [75].

Consumo energético	
	[J/kWh]
Energia total	171920,9
Combustíveis fósseis	125963,0
Carvão	82184,4
Gás Natural	103,4
Petróleo	43675,2

Quadro 38 – Emissões de poluentes na produção de torres eólicas incluído na produção de electricidade por parte destas [75].

Emissões de poluentes	
	[g/kWh]
VOC	0,044
CO	0,087
NO_x	0,050
PM	0,012
SO_x	0,013
CH₄	0,041
N₂O	0,000
CO₂	22,826
GEE	23,976

4.5.12. Hidrogénio

A folha de cálculo “Hidrogénio” apresenta os cálculos para os consumos energéticos e emissões de poluentes das várias formas de produção de H₂ incluídas no modelo MACV2H₂. O modelo permite a produção de H₂ líquido e gasoso em plantas centralizadas a partir de GN, energia solar fotovoltaica, energia eólica, carvão e biomassa. No entanto o modelo também permite a produção de H₂ nos dois estados

físicos referidos a partir de GN e de electrólise com electricidade do sistema electroprodutor nacional. A produção de H₂ por GN é efectuada por reformação a vapor (*steam reforming*). No caso da produção de H₂ por recurso a energia solar fotovoltaica ou energia eólica, a produção é efectuada por electrólise, ou seja, é considerada a produção de electricidade por parte dos painéis solares ou das torres eólicas e posteriormente a electricidade produzida será utilizada para produção de H₂ por electrólise. Por fim na produção de H₂ por carvão ou por biomassa é utilizada a gaseificação.

A folha de cálculo em questão encontra-se sequenciada em sete pontos, que serão descritos de seguida.

O primeiro ponto efectua unicamente a interpretação de alguns dos dados introduzidos pelo utilizador na folha de cálculo “Dados de Entrada”, nomeadamente os referentes ao local e matéria-prima para produção de H₂ e os relativos à opção de CCS em plantas centralizadas de produção de H₂. Neste último se o utilizador introduzir que não pretende incluir a tecnologia CCS o modelo apresenta neste ponto 0% de sequestro de CO₂. Contudo se o utilizador introduzir que pretende efectuar a análise de produção de H₂ com CCS, o modelo apresenta neste ponto um sequestro de CO₂ de 90%, valor genérico segundo um documento da Comissão Europeia [78].

No segundo encontram-se os pesos relativos das tecnologias de combustão estacionária na produção de hidrogénio líquido e gasoso. Como acontece nas folhas de cálculo anteriores, estes valores dos pesos relativos das tecnologias de combustão estacionária, são importantes para o cálculo das emissões de poluentes para os vários tipos de H₂ produzido pelas várias matérias-primas consideradas pelo modelo. Os referidos valores podem ser observados nos Quadros 39 e 40.

Quadro 39 – Pesos relativos das tecnologias de combustão estacionária na produção de hidrogénio gasoso [71].

	Plantas Centralizadas	Estações de Reabastecimento	Compressão
Caldeira Industrial a Fuel óleo	100%	100%	100%
Caldeira Industrial a Gasóleo	33%	33%	0%
Motor estacionário a Gasóleo	33%	33%	50%
Turbina a Gasóleo	34%	34%	50%
Motor a GN	0%	0%	100%
Turbina a GN	0%	0%	0%
Caldeira industrial a GN	100%	100%	0%
Caldeira industrial a Carvão	100%	0%	0%

Quadro 40 – Pesos relativos das tecnologias de combustão estacionária na produção de hidrogénio líquido [71].

	Plantas Centralizadas	Estações de Reabastecimento	Liquefacção
Caldeira Industrial a Fuel óleo	100%	100%	100%
Caldeira Industrial a Gasóleo	33%	33%	33%
Motor estacionário a Gasóleo	33%	33%	33%
Turbina a Gasóleo	34%	34%	34%
Motor a GN	0%	0%	0%
Turbina a GN	0%	0%	100%
Caldeira industrial a GN	100%	100%	0%
Caldeira industrial a Carvão	100%	0%	0%

No ponto seguinte encontra-se os valores da eficiência global e das emissões urbanas nos processos de produção de H₂. No caso das emissões urbanas manteve-se os valores do modelo GREET 1.8c devido à falta de alternativas. Contudo os valores da eficiência global dos processos de produção de H₂ incluídos no MACV2H₂ encontram-se no Quadro 41.

Quadro 41 – Eficiência global dos processos de produção de H₂ [23, 29, 71, 79, 80].

	Reformação a vapor do GN		Gaseificação do carvão		Gaseificação da biomassa		Electrólise
	Sem co-produção	Com co-produção	Sem co-produção	Com co-produção	Sem co-produção	Com co-produção	
Eficiência Global	71,5%	69,5%	68,2%	45,95%	51%	47,5%	72%

Segundo um documento redigido pela *New York Power Authority* a eficiência da reformação a vapor do GN varia entre 65% e 75% [23]. Como os valores apresentados no modelo GREET 1.8c encontram-se dentro do intervalo apresentado no referido documento, decidiu-se manter os valores do GREET 1.8c.

No caso da gaseificação do carvão não se manteve os valores apresentados no GREET 1.8c. Os valores do GREET 1.8c para gaseificação do carvão sem co-produção encontram-se no intervalo dos valores apresentados no artigo publicado por Zaporowski [79]. Contudo os valores do GREET 1.8c para a gaseificação do carvão com co-produção são superiores a todos os valores apresentados no artigo. Sendo assim e como Zaporowski [79] apresenta vários valores para a gaseificação com e sem co-produção efectuou-se uma média de forma a não apresentar nem as melhores nem as piores eficiências de gaseificação do carvão, ou seja, deste modo tenta-se com os valores apresentados representar uma tecnologia de gaseificação de carvão intermédia.

Para determinar os valores da gaseificação da biomassa consultou-se artigo publicado por Lapuerta et al. [80]. Os valores apresentados no modelo GREET 1.8c encontram-se dentro da gama dos vários valores para a gaseificação da biomassa demonstrados no referido artigo. Deste modo, como quer os valores da gaseificação da biomassa com e

sem co-produção se encontram na gama apresentada no artigo, manteve-se os valores do GREET 1.8c.

Por fim, para obter o valor da eficiência global da electrólise, consultou-se um artigo publicado por Barbir [29]. No artigo de Barbir, é referido que a eficiência da electrólise varia com a temperatura da pilha de combustível e com a composição da água. Contudo é referido que a eficiência típica da electrólise varia entre 65% e 80%. Deste modo considerou-se que a eficiência global do processo de electrólise é de 72%, como se pode verificar no Quadro 41.

No quadro seguinte são apresentados outros valores de eficiência global de processos inerentes à produção de H_2 .

Quadro 42 – Valores de eficiência global de processos inerentes à produção de H_2 [81, 82].

	Produção de vapor			Compressão	Liquefacção	
	GN	Carvão	Biomassa		Plantas centralizadas	Estações de reabastecimento
Eficiência Global	80%	83%	75%	93,1%	80%	70%

O valor da eficiência de compressão é obtido de acordo com o peso relativo dos combustíveis e com a conjugação dos valores da eficiência de compressão eléctrica e eficiência de compressão com motor a GN, presentes na folha de cálculo “Compressão”, ver secção 4.5.14. Deste modo o valor apresentado no Quadro 42 corresponde à eficiência global de compressão eléctrica em estações de reabastecimento. No caso dos valores da eficiência global de produção de vapor são apresentados de acordo com a EPA [81]. A eficiência para a liquefacção, segundo os dados da Praxair, apresenta valores diferentes quer seja em pequena ou em larga escala [82]. Deste modo o valor apresentado no Quadro 42 para o processo de liquefacção do H_2 em estações de reabastecimento é o apresentado pela Praixair como sendo de pequena escala, sendo que o de larga escala corresponde ao processo de liquefacção em plantas centralizadas.

O terceiro ponto apresenta o peso relativo dos combustíveis nos processos de produção de hidrogénio líquido e gasoso. O modelo MACV2 H_2 considera por defeito que a produção de vapor é efectuada com GN e que o processo de compressão assim como o de liquefacção são efectuados com electricidade do sistema electroprodutor Português. O peso relativo dos combustíveis nos processos de produção de H_2 encontram-se nos Quadros 43 e 44, e foram obtidos no modelo GREET 1.8c.

Quadro 43 – Valores do peso relativo dos combustíveis no processo de produção de H₂ em plantas centralizadas [71].

	GN em H₂	Eólica em H₂	Fotovoltaico em H₂	Carvão em H₂	Biomassa em H₂
Fuel óleo	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gasóleo	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gasolina	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gás Natural	99,8%	0,0%	0,0%	0,0%	2,3%
Carvão	0,0%	0,0%	0,0%	99,4%	95,5%
Electricidade	0,2%	0,0%	0,0%	0,6%	2,2%

Quadro 44 – Valores do peso relativo dos combustíveis no processo de produção de H₂ em estações de reabastecimento [71].

	GN em H₂	Electrólise (mix) em H₂
Fuel óleo	0,0%	0,0%
Gasóleo	0,0%	0,0%
Gasolina	0,0%	0,0%
Gás Natural	95,1%	0,0%
Carvão	0,0%	0,0%
Electricidade	4,9%	100,0%

Nos pontos cinco e seis da presente folha são efectuados os cálculos do consumo energético e emissões de poluentes para os vários processos inerentes à produção de hidrogénio líquido e gasoso com as várias matérias-primas abrangidas pelo MACV2H₂.

Por fim no último ponto é apresentado um resumo do consumo energético e emissões de poluentes na produção de H₂ por cada uma das matérias-primas consideradas no modelo. Neste ponto o consumo energético é expresso em unidade de energia consumida por unidade de energia de H₂ transformado (J/kWh_{transformado}). As emissões de poluentes são dadas em gramas por unidade de energia de H₂ transformado (g/kWh_{transformado}).

De salientar que no caso do G.H₂ produzido em plantas centralizadas este pode ser distribuído por gasoduto ou camião para as estações de reabastecimento onde será posteriormente comprimido. No entanto o L.H₂ produzido nas plantas centralizadas é liquefeito lá e posteriormente transportado em camiões para as estações de reabastecimento. O G.H₂ produzido em estações de reabastecimento é comprimido no local, assim como o L.H₂ é liquefeito na própria estação de reabastecimento.

4.5.13. Fertilizantes

Na folha de cálculo denominada “Fertilizantes” são efectuados os cálculos relativos ao consumo energético e às emissões de poluentes dos químicos agrícolas. Os químicos agrícolas abordados são os fertilizantes, os herbicidas e os insecticidas, tendo ambos particular importância no processo de criação da biomassa. O modelo MACV2H₂ considera os fertilizantes NPK, ou seja o Azoto que inclui a ureia, a amónia e o nitrato de amónia, o potássio na forma de P₂O₅ e o fosfato na forma de K₂O. O modelo

considera também o carbonato de cálcio (CaCO_3). A presente folha é composta por quatro pontos principais.

No primeiro ponto são abordadas apenas as tecnologias de combustão estacionária nos processos de produção dos fertilizantes, dos herbicidas e dos insecticidas. Os valores que o MACV2H₂ apresenta neste ponto encontram-se representados no quadro seguinte, sendo a fonte dos valores o modelo GREET 1.8c. Manteve-se de novo o GREET como fonte dos valores dos pesos relativos das tecnologias estacionárias, devido à falta de fontes alternativas.

Quadro 45 – Peso relativos das tecnologias de combustão estacionária na produção dos fertilizantes, herbicidas e insecticidas [71].

	Azoto	P₂O₅	K₂O	CaCO₃	Herbicidas	Insecticidas
Caldeira Industrial a Fuel óleo	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Caldeira Industrial a Gasóleo	80%	80%	80%	80%	80%	80%
Motor estacionário a Gasóleo	15%	15%	15%	15%	15%	15%
Turbina a Gasóleo	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Motor a GN	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Turbina a GN	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Caldeira industrial a GN	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Turbina a Carvão IGCC	100%	100%	100%	100%	100%	100%

No segundo ponto são efectuados os cálculos do consumo energético e das emissões de poluentes associados aos processos de produção e de transporte dos químicos agrícolas. Os valores quer de consumos energéticos quer de emissões para o transporte dos químicos são importados da folha de cálculo “Transporte” e portanto serão explicados posteriormente na secção 4.5.15. O consumo energético da produção dos químicos é obtido tendo em conta os pesos relativos dos combustíveis. No caso das emissões de poluentes para além do peso relativo dos combustíveis são essenciais os valores do peso relativos das tecnologias estacionárias (Quadro 45), conjuntamente com os factores de emissão das tecnologias estacionárias presentes na folha “FE”.

O terceiro ponto apresenta-se como um resumo intermédio. Neste ponto são apresentados os consumos energéticos totais e emissões totais de cada um dos químicos, ou seja, os consumos energéticos e as emissões da fase de produção e de transporte de cada um dos químicos.

Por fim no último ponto é apresentado um resumo final dos consumos energéticos e das emissões de poluentes inerentes à produção e distribuição dos fertilizantes mencionados, dos herbicidas e dos insecticidas. Neste ponto os valores do consumo energético são expressos em unidade energética por grama produzida ($\text{J/g}_{\text{produzido}}$) e as emissões em gramas por grama produzida ($\text{g/g}_{\text{produzido}}$).

4.5.14. Compressão

Na elaboração da folha de cálculo “Compressão” tomou-se como base os dados apresentados no modelo GREET. Na presente folha são efectuados os cálculos para eficiência e energia de compressão quer do GN quer H₂ produzido em plantas centralizadas e em estações de reabastecimento.

Os valores das células com fundo amarelo foram mantidos do modelo GREET com excepção da pressão final do H₂ que se considerou ser 350 bar [71]. Contudo as células apresentam fundo amarelo, ou seja, o utilizador pode alterar esses valores, proporcionando que o modelo MACV2H₂ efectue os novos cálculos para a eficiência e energia de compressão.

4.5.15. Transporte

Na folha de cálculo “Transportes” são efectuados os cálculos relativos ao consumo energético e às emissões de poluentes associados ao transporte de todas as matérias-primas e de todos os combustíveis considerados no modelo MACV2H₂. A presente folha encontra-se decomposta em dez pontos principais.

No primeiro ponto é apresentada a carga em toneladas, de cada matéria-prima e combustível, transportada em petroleiro, navio e camião. Devido à falta de dados considerou-se os valores do modelo GREET [71]. Com os valores deste ponto é possível obter a potência requerida pelos navios e petroleiros, sendo estes apresentados no ponto dois.

O terceiro ponto apresenta o consumo de combustível e o consumo de energia dos camiões de transporte. De acordo com o tipo e a carga de camião seleccionado pelo utilizador na folha “Dados de Entrada” o modelo interage com a folha “FE” e calcula o consumo de combustível do camião (l/100km) e o consumo energético por quilómetro (J/km).

Os dois pontos seguintes apresentam valores de intensidade energética. No quarto ponto é apresentada a intensidade energética para o transporte em gasoduto, valores obtidos por intermédio do modelo GREET [71]. No entanto existe a excepção do GN e do G.H₂ que os valores de intensidade energética são calculados de acordo com os dados energéticos da folha de cálculo “Compressão”. No ponto seguinte do modelo é apresentada a intensidade energética do transporte em comboio cujo valor é 199952 J/ton.km [83]. O modelo MACV2H₂ considera a viagem de ida e de retorno para os diversos meios de transporte, uma vez que os diferentes factores de carga em cada tipo de viagem proporcionam diferentes intensidades energéticas, logo diferentes consumos energéticos e emissões.

O sexto ponto apresenta o consumo energético dos petroleiros e dos navios. Os valores são calculados de acordo com o factor de carga introduzido pelo utilizador na folha “Dados de Entrada” e com as propriedades do combustível na folha “Combustíveis”.

Nos pontos seguintes são efectuados os cálculos do consumo energético e das emissões no transporte de combustíveis e matérias-primas. Posteriormente no último ponto é efectuado um resumo dos consumos energéticos e emissões no transporte e distribuição dos combustíveis e matérias-primas. O consumo energético é dado em unidade de energia consumida por unidade de energia transportada ($\text{J/kWh}_{\text{transportado}}$) e as emissões em gramas por unidade energética transportada ($\text{g/kWh}_{\text{transportado}}$) no caso do transporte de combustíveis. No transporte de matérias-primas, o consumo energético é dado em unidade de energia consumida por tonelada transportada ($\text{J/ton}_{\text{transportado}}$) e as emissões em gramas emitidas por tonelada transportada ($\text{g/ton}_{\text{transportado}}$).

De salientar ainda a necessidade da introdução da distância total para cada meio de transporte, no ponto oito.

4.5.16. Veículos

Na folha de cálculo “Veículos” são efectuados os cálculos dos consumos energéticos e das emissões associadas aos veículos incorporados no modelo MACV2H₂. O modelo para efectuar os cálculos recorre à velocidade média da viagem a simular introduzida pelo utilizador na folha “Dados de Entrada” e às constantes presentes na folha “Base de dados”.

O modelo considera uma vasta gama de veículos que o utilizador pode seleccionar para a simulação pretendida, sendo que em cenário base o modelo MACV2H₂ considera que os veículos ligeiros de passageiros e os motociclos são a gasolina e os veículos pesados de mercadorias e de passageiros são a gasóleo. O MACV2H₂ apresenta os seguintes veículos:

- Pesados de mercadorias até 7,5t
- Pesados de mercadorias 7,5t até 12t
- Pesados de mercadorias 12t até 14t
- Pesados de mercadorias 14t até 20t
- Pesados de mercadorias 20t até 26t
- Pesados de mercadorias 26t até 28t
- Pesados de mercadorias 28t até 32t
- Pesados de mercadorias superiores a 32t
- Pesados de passageiros turísticos até 18t
- Pesados de passageiros turísticos superiores a 18t
- Pesados de passageiros urbanos até 15t
- Pesados de passageiros urbanos 15t até 18t
- Pesados de passageiros urbanos articulados superiores a 18t

- Ligeiros de passageiros a gasolina cilindrada inferior a 1,4l
- Ligeiros de passageiros a gasolina cilindrada 1,4l até 2,0l
- Ligeiros de passageiros a gasolina cilindrada superior a 2,0l
- Motociclos a gasolina com cilindrada inferior a 50 cm³

Devido aos vários tipos de veículos abrangidos pelo modelo MACV2H₂, a presente folha de cálculo encontra-se dividida em cinco pontos principais.

No primeiro ponto são apresentados os factores de emissão e factor de consumo para os veículos pesados de mercadorias. Os factores de emissão e o consumo de combustível são calculados para veículos pesados de mercadorias dentro de várias normas e para cargas de 0%, 50% e 100% de acordo com equações do Emission Inventory Guidebook [84]. O modelo MACV2H₂ utiliza as equações do Emission Inventory Guidebook conjugadas com a velocidade média introduzida pelo utilizador na folha “Dados de Entrada” e com as constantes presentes na folha “Base de dados” e calcula desta forma os factores de emissão e o factor de consumo para os veículos pesados de mercadorias a gasóleo com diferentes taras, normas e factores de carga. As equações utilizadas pelo modelo assim como as constantes encontram-se em Anexo, dos Quadros A 1 ao A 15.

O segundo ponto da presente folha de cálculo é semelhante ao primeiro, no entanto diz respeito aos veículos pesados de passageiros a gasóleo. Tal como no ponto anterior o modelo MACV2H₂ efectua os cálculos para os factores de emissão e o factor de consumo dos veículos pesados de passageiros da norma convencional à norma EURO V com os factores de carga de 0%, 50% e 100% de acordo com as equações e as constantes Emission Inventory Guidebook apresentadas em Anexo, dos Quadros A 16 ao A 30. O modelo utiliza ainda a velocidade média introduzida inicialmente pelo utilizador na segunda folha de cálculo.

O terceiro ponto corresponde ao cálculo dos factores de emissão e factor de consumo de combustível associado aos veículos ligeiros de passageiros a gasolina. O modelo MACV2H₂ efectua os referidos cálculos para três gamas de cilindrada e para várias normas.

Dentro de cada uma das normas mencionadas são considerados três gamas de cilindrada, ou seja, cilindrada inferior a 1,4l, de 1,4l a 2,0l e superior a 2,0l.

O modelo utiliza a equação seguinte presente no Emission Inventory Guidebook, para o cálculo dos factores de emissão e factor de consumo dos veículos ligeiros de passageiros a gasolina de norma EURO. No caso das normas antecedentes às normas EURO, a velocidade introduzida pelo utilizador é a única influência, como pode ser observado em Anexo, dos Quadros A 31 ao A 34.

$$EF = \frac{a + c * V + e * V^2}{1 + b * V + d * V^2} \quad \text{Equação 28}$$

As letras *a, b, c, d* e *e* presentes na Equação 28 correspondem às constantes que podem ser consultadas em Anexo no Quadros A 35. O *V* representa a velocidade média introduzida pelo utilizador na folha “Dados de Entrada”.

No quarto ponto o modelo apresenta os valores dos factores de emissão e factor de consumo para os motociclos a dois tempos a gasolina com cilindrada inferior a 50 cm³. No caso dos motociclos a dois tempos a gasolina com cilindrada inferior a 50 cm³ o modelo só permite simulações em ambiente urbano. Os valores dos factores de emissão e factor de consumos são apresentados no quadro seguinte.

Quadro 46 – Factores de emissão e de consumo dos motociclos a dois tempos a gasolina com cilindrada inferior a 50 cm³ [84].

	CO [g/km]	NO _x [g/km]	VOC [g/km]	PM [g/km]	Consumo de combustível [g/km]
Convencional	13,80	0,02	13,91	0,19	25,00
EURO I	5,60	0,02	2,73	0,08	15,00
EURO II	1,30	0,26	1,56	0,04	12,08
EURO III	1,00	0,26	1,20	0,01	10,50

Por fim o último ponto apresenta um rácio do consumo de combustível e das emissões de poluentes dos veículos com combustíveis alternativos relativamente aos veículos do cenário base. Os valores presentes neste ponto vão permitir que o modelo calcule emissões e consumos dos veículos alternativos de acordo com os valores apresentados nos quatros pontos anteriores da presente folha de cálculo. Para os valores de rácio de consumo de combustível e de emissões presentes neste ponto utilizou-se como fonte o modelo GREET [71].

4.5.17. Resultados

A folha de cálculo “Resultados”, como o próprio nome indica, apresenta os resultados dos cálculos efectuados nas folhas de cálculo anteriores com os dados introduzidos pelo utilizador. Deste modo a presente folha dedica-se exclusivamente à apresentação de resultados com os dados introduzidos por parte do utilizador nas folhas de cálculo anteriores, ou seja, na presente folha de cálculo não há qualquer introdução de dados por parte do utilizador, funcionando desta forma os valores das folhas de cálculo anteriores como dados de entrada. A folha “Resultados” encontra-se decomposta em três pontos principais de forma a apresentar os resultados WTP e WTW para os dados introduzidos inicialmente.

O primeiro ponto baseia-se numa análise dos combustíveis desde a sua produção até à sua disponibilização no ponto de abastecimento, ou seja, no primeiro ponto são apresentados os consumos energéticos e as emissões de poluentes numa análise WTP dos combustíveis considerados.

Para além do H_2 o modelo MACV2H2 apresenta a análise WTP e WTW para outros combustíveis, como é o caso da gasolina, do gasóleo e do GPL. São apresentados também os resultados WTP e WTW para electricidade.

Neste ponto são abordados os consumos energéticos e emissões de poluentes da produção e do transporte até à estação de reabastecimento dos combustíveis considerados. O consumo energético neste ponto é expresso em unidade de energia por unidade de energia de combustível disponível na estação de reabastecimento ($J/kWh_{\text{disponível}}$) e as emissões de poluentes são expressas em gramas por unidade de energia de combustível disponível na estação de reabastecimento ($g/kWh_{\text{disponível}}$).

O segundo ponto diz respeito a uma análise desde a produção dos combustíveis até à fase em que são utilizados nos veículos, ou seja, é apresentada uma análise WTW dos combustíveis considerados aplicados aos vários veículos considerados. Se o utilizador seleccionar na folha de cálculo “Dados de Entrada” os veículos ligeiros de passageiros ou os motociclos com cilindrada inferior a 50 cm^3 para efectuar a simulação, o modelo considera a gasolina como combustível de cenário base. No caso da selecção por parte do utilizador dos veículos pesados de passageiros ou de mercadorias, o modelo considera o gasóleo como combustível de cenário base. Para além do veículo com combustível de cenário base, que como referido anteriormente depende da introdução dos dados por parte do utilizador na folha “Dados de Entrada”, o modelo considera:

- Veículo a GPL
- Veículo a electricidade,
- FCV a $G.H_2$
- FCV a $L.H_2$
- ICE a $G.H_2$
- ICE a $L.H_2$
- HEV independente da rede a $G.H_2$
- HEV independente da rede a $L.H_2$

Neste ponto o modelo apresenta os resultados WTW não só em termos de consumos energéticos e emissões totais, como em cada uma das fases. Sendo assim o modelo apresenta os consumos energéticos e emissões na fase de produção e transporte da matéria-prima, na de produção e transporte do combustível e na de operação do veículo. Nesta fase os resultados a nível de consumos energéticos são expressos em unidade de energia consumida por quilómetro (J/km). Relativamente às emissões de poluentes são dados em gramas por quilómetro (g/km).

O último ponto corresponde a uma comparação percentual dos restantes veículos face ao veículo de referência. Neste ponto podem ser apresentados valores percentuais positivos ou negativos. Os valores positivos significam um aumento e os valores percentuais negativos significam uma diminuição de consumo energético e emissão de poluentes relativamente ao veículo com o combustível de referência.

4.5.18. Gráficos

A folha de cálculo “Gráficos” diz respeito à representação gráfica de alguns dos resultados, comunicando directamente apenas com a folha de cálculo “Resultados”. O objectivo da folha “Gráficos” é facilitar a interpretação dos resultados apresentados na folha de cálculo anterior. Na presente folha são apresentados graficamente os resultados WTP, WTW e relação percentual correspondente ao aumento ou diminuição no consumo energético ou na emissão de poluentes dos veículos alternativos face ao veículo base. Nesta folha são também apresentados gráficos com o peso relativo em relação a consumos energéticos e emissões em cada uma das três etapas (produção e transporte da matéria-prima, produção e transporte do combustível e operação do veículo).

4.5.19. Percurso

A folha “Percurso” diz respeito exclusivamente a simulação WTW efectuada num determinado percurso. Com a introdução por parte do utilizador dos quilómetros totais do percurso na folha de cálculo “Dados de Entrada”, o modelo conjuntamente com os resultados WTW totais da folha “Resultados” efectua os cálculos e apresenta na folha de cálculo em questão, as emissões e consumos energéticos totais no percurso requerido para os veículos com os combustíveis considerados no modelo. As emissões são expressas em unidade de massa (g ou kg) e o consumo energético é expresso em unidade energética consumida (MJ).

4.5.20. Base de dados

A folha de cálculo “Base de dados” é a última folha do modelo MACV2H₂. A presente folha tal como as três anteriores não se destina à introdução de dados por parte do utilizador, sendo que a presente folha apresenta uma particularidade relativamente às anteriores. A folha “Base de dados” não importa valores de nenhuma das folhas anteriores, destinando-se unicamente a fornecer dados às folhas anteriores, nomeadamente à folha “FE” e à folha “Veículos”. De um modo geral a presente folha apresenta os dados essenciais para o cálculo dos factores de emissão dos veículos rodoviários presentes no modelo.

5. Resultados e sua Discussão

Neste capítulo será apresentado um caso prático do modelo MACV2H₂, analisando um percurso em termos de emissões e consumos de energia no ciclo de vida do H₂ nas formas WTP e WTW.

Contudo numa fase inicial, será efectuada uma calibração do modelo. De seguida por análise de casos já estudados vai-se analisar o consumo de combustível para o veículo a H₂ do modelo MACV2H₂ comparativamente com os dados existentes.

5.1. Calibração do modelo

Nesta fase efectuou-se uma comparação dos resultados apresentados pelo MACV2H₂ para o consumo dos veículos com dados reais apresentados por marcas de veículos a H₂ ou com dados presentes em artigos científicos. A análise foi efectuada para veículos ligeiros de passageiros, veículos pesados de passageiros e para motociclos com cilindrada inferior a 50 cm³. Em qualquer uma das análises tentou-se representar as características descritas pelos fabricantes ou nos artigos cinéticos.

Relativamente aos veículos ligeiros de passageiros, analisou-se os resultados apresentados pelo modelo MACV2H₂ com os dados apresentados para o BMW mono-fuel hydrogen, o Quantum Prius e o Fiat Panda hydrogen 3^a geração.

O BMW mono-fuel hydrogen foi construído com base no BMW 760Li. Este veículo apesar de injectar G.H₂, o armazenamento do combustível a bordo é na forma líquida, tendo capacidade para armazenar 8kg de H₂ [85]. No quadro seguinte são apresentadas algumas características do modelo.

Quadro 47 – Dados do BMW mono-fuel hydrogen [85].

Ano	2007
Motor	ICE 6,0l V12
Peso [kg]	2460
Consumo em Auto-Estrada [kg_{H2}/100km]	2,1

Seleccionou-se no modelo a norma (EURO IV), e a cilindrada. Como o veículo apresenta uma cilindrada de 6,0l, no modelo introduziu-se cilindrada superior a 2,0l. Em relação à velocidade de circulação, factor relevante para o consumo, efectuaram-se três cenários de velocidades possíveis em auto-estrada (Quadro 48).

Com a introdução dos dados referidos anteriormente obtêm-se o consumo do veículo para os cenários considerados. No quadro seguinte são apresentados estes resultados juntamente com a variação percentual do consumo registado no modelo MACV2H₂ em cada um dos cenários face ao valor real.

Quadro 48 – Comparação do consumo do BMW mono-fuel hydrogen com os dados do modelo MACV2H₂.

	BMW 7 H ₂	Cenário 1 V=110 km/h	Cenário 2 V=115 km/h	Cenário 3 V=120 km/h
Consumo [kg_{H2}/100km]	2,10	2,05	2,10	2,16
Δ		-2,4%	0,0%	2,9%

Em qualquer um dos cenários analisados verifica-se uma grande proximidade em termos do consumo de H₂ aos cem quilómetros com os dados apresentados para o veículo BMW mono-fuel hydrogen. No segundo cenário a variação é mesmo nula face aos dados apresentados para o consumo do BMW a H₂ em ciclo de auto-estrada. No cenário 1 o consumo apresentado pelo MACV2H₂ é inferior ao do BMW a H₂, contudo é inferior em apenas 2,4% do consumo apresentado para o BMW. No terceiro cenário, ocorre o oposto, ou seja, o consumo dado pelo modelo é superior, no entanto é superior em apenas 2,9% do consumo dado para o BMW. Deste modo verifica-se uma boa proximidade do modelo aos dados reais apresentados, no entanto efectuar-se-ão mais análises de forma a testar melhor a veracidade dos dados fornecidos pelo modelo.

De seguida efectuou-se uma análise comparativa com o Fiat Panda hydrogen 3^a. As especificações do Fiat Panda a H₂ são apresentadas no quadro seguinte.

Quadro 49 – Especificações do Fiat Panda hydrogen 3^a geração [86].

Ano	2006
Motor	FCV 75kW
Armazenamento	G.H ₂ @ 350bar
Tempo de reabastecimento [min]	5
Autonomia em circuito urbano [km]	220
Consumo ciclo urbano [kg_{H2}/100km]	0,73

Como é dado para o veículo em questão o consumo de H₂ em circuito urbano, consideraram-se três cenários com velocidades possíveis num circuito urbano (Quadro 50).

As simulações foram ainda efectuadas com o PCI do H₂ para um veículo norma EURO IV com cilindrada inferior a 1,4l. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 50 juntamente com a variação dos valores dos consumos obtidos no modelo MACV2H₂ face ao valor real do Fiat Panda a H₂.

Quadro 50 – Comparação do consumo do Fiat Panda hydrogen 3^a geração com os dados do modelo MACV2H₂.

	Fiat Panda H ₂	Cenário 1 V=35 km/h	Cenário 2 V=40km/h	Cenário 3 V=45km/h
Consumo [kg_{H2}/100km]	0,73	0,84	0,78	0,75
Δ		15,5%	7,3%	3,1%

Os valores de consumo de H₂ obtidos no modelo são sempre superiores ao apresentado nas especificações do Fiat Panda hydrogen 3^a geração. O valor que apresenta maior

proximidade com o real é o do cenário 3, com uma discrepância de 3,1%. No cenário 1 a variação é 15,5% do valor apresentado para o Fiat. Uma vez que não se sabe ao certo a velocidade de teste, ou seja, o fabricante apenas refere que os dados do consumo são em circuito urbano, consideram-se aceitáveis os resultados do modelo MACV2H₂.

O último veículo ligeiro de passageiros a analisar foi o Quantum Prius. Este veículo possui algumas características que o diferenciam dos anteriores, nomeadamente ser um veículo híbrido eléctrico com motor a combustão interna a H₂. O depósito do Quantum Prius é de G.H₂. As especificações do veículo são apresentadas no quadro seguinte.

Quadro 51 – Especificações do Quantum Prius [87, 88].

Ano	2005
Motor	HEV:ICE 1,5l
Armazenamento	G.H ₂ @ 350bar
Tempo de reabastecimento [min]	5
Estimativa de consumo [kg_{H2}/100km]	1,04 – 1,55

Considerou-se novamente três gamas de velocidade para efectuar a simulação, para além desta se efectuar com o PCI do H₂ para um veículo de norma EURO IV com cilindrada ente 1,4l e 2,0l. Os cenários considerados podem ser visionados no Quadro 52, onde também se encontram os resultados obtidos.

Quadro 52 – Comparação do consumo do Quantum Prius com os dados do modelo MACV2H₂.

	Quantum Prius	Cenário 1 V=40 km/h	Cenário 2 V=70 km/h	Cenário 3 V=110 km/h
Consumo [kg_{H2}/100km]	1,29	1,37	1,20	1,30
Δ		6,2%	-7,0%	0,8%

O consumo apresentado para o Quantum Prius do Quadro 52 corresponde a uma média dos consumos estimados como reais apresentados no Quadro 51, de forma a se poder calcular a variação do modelo face ao valor real. Verifica-se que para os três cenários analisados a variação é inferior a 10%. No entanto, neste caso, mais importante que analisar a variação, é verificar que os consumos apresentados pelo modelo MACV2H₂ para os três cenários encontram-se dentro da gama de consumo estimada como real para o Quantum Prius, ou seja, de 1,04 a 1,55 kg_{H2}/100km.

Para efectuar o teste com os motociclos seleccionou-se para análise a APFCT Scooter ZES. Este veículo com célula de combustível e armazenamento do H₂ em metais híbridos apresenta duas gamas de consumo, sendo que no total armazena 90 gramas de H₂. O consumo da Scooter ZES a uma velocidade de 30 km/h é de 0,12 kg_{H2}/100km, mas em circuito urbano o consumo é de 0,18 kg_{H2}/100km [89]. A simulação decorrerá para circuito urbano uma vez que para motociclos de cilindrada inferior a 50 cm³ o modelo MACV2H₂ só permite a simulação em circuito urbano. De salientar ainda que a simulação ocorre com o PCI do H₂ para um motociclo com cilindrada inferior a 50 cm³ de norma EURO III. Os resultados são apresentados no quadro seguinte.

Quadro 53 – Comparação do consumo da Scooter ZES com os dados do modelo MACV2H₂.

	Scooter ZES	MACV2H ₂
Consumo [kg_{H2}/100km]	0,18	0,17
Δ		-5,6%

Para circulação em circuito urbano, verifica-se que o consumo apresentado pelo modelo MACV2H₂ para motociclos de cilindrada inferior a 50 cm³ é próximo do consumo apresentado pela APFCT para a Scooter ZES. O modelo apresenta um consumo inferior, no entanto a variação é de 5,6% do valor de consumo real da Scooter ZES.

No entanto efectuou-se também simulações de forma a analisar veículos pesados de passageiros. Num ensaio com veículos pesados de passageiros utilizou-se os dados do Mercedes Citaro de 2002. Este veículo, que não é mais que um autocarro urbano, circulou na cidade do Porto ao abrigo do projecto CUTE. O local da cidade do Porto onde o Mercedes Citaro circulou apresenta 7,8 km de comprimento com declives superiores a 10% [44]. No quadro seguinte são apresentadas as características do Mercedes Citaro a gasóleo e a H₂.

Quadro 54 – Especificações do Mercedes Citaro 2002 [44].

Ano	2002
Motor	FCV 12l
Armazenamento	G.H ₂ @ 350bar
Tara autocarro a gasóleo [t]	11,5
Tara autocarro a H₂ [t]	14
Consumo autocarro a gasóleo [l_{gasóleo}/7,8km]	5,45
Consumo autocarro a H₂ [kg_{H2}/7,8km]	1,66

Sendo assim no modelo MACV2H₂ seleccionou-se um autocarro urbano de norma EURO III com tara igual ou inferior a 15t e com uma carga de 100% para efectuar um percurso de 7,8 km. As simulações foram efectuadas com o PCI dos combustíveis. Na velocidade dos veículos pesados de passageiros introduziu-se 8,9 km/h, uma vez que é a velocidade média dos autocarros para os consumos apresentados no percurso da cidade do Porto [45]. Com os referidos dados introduzidos obteve-se os resultados presentes no Quadro 55.

Quadro 55 – Comparação do consumo do Mercedes Citaro com os dados do modelo MACV2H₂.

	Mercedes H ₂ (real)	Mercedes gasóleo (real)	Mercedes H ₂ (MACV2H ₂)	Mercedes gasóleo (MACV2H ₂)
Consumo [kg_{H2} / l_{gasóleo} aos 7,8km]	1,66	5,45	0,78	4,17
Δ			-53,0%	-23,5%
Consumo Energético [kW]	54,2	51,6	25,97	41,47
Δ			-52,1%	-19,6%

Verifica-se que quer os valores do Mercedes Citaro a H₂ quer os do Mercedes a gásóleo são superiores aos apresentados pelo modelo MACV2H₂, apresentando os resultados do modelo para o Mercedes a H₂ maior discrepância dos reais que os do Mercedes a gásóleo. O modelo MACV2H₂ apresenta para o Mercedes Citaro a H₂ um consumo de combustível inferior em 53,0% e um consumo energético inferior em 52,1%, face aos valores reais. No entanto os valores apresentados pelo modelo para o Mercedes Citaro a gásóleo apresentam variações inferiores em relação aos valores reais, contudo ainda muito acima dos 10%. O modelo apresenta um consumo de gásóleo 23,5% inferior e um consumo energético 19,6% inferior aos valores reais.

A incoerência de valores por parte dos dados fornecidos pelo modelo para o Mercedes Citaro a gásóleo deve-se ao facto de as ruas apresentarem inclinações superiores a 10% [44]. O modelo MACV2H₂ não permite a inclusão deste factor na simulação. Este factor também justifica parte da discrepância no caso dos valores apresentados para o Mercedes a H₂. A restante discrepância para os dados fornecidos pelo modelo para o autocarro a FC a H₂ é justificada com o aumento de peso que o veículo a H₂ sofreu. O autocarro a gásóleo possui 11,5t, em contra-partida o autocarro a H₂ possui 14t, diferença de peso que não é possível discriminar no modelo. O aumento de peso juntamente com o efeito de “*power dump*” pode originar um aumento de consumo de cerca de 25% [45]. O efeito de “*power dump*” não é mais do que a energia da célula de combustível que é directamente consumida por um resistor eléctrico que proporciona o aquecimento/arrefecimento no veículo.

Por fim efectuou-se uma análise comparativa com um veículo pesado de passageiros urbano (NL 263 FC) do fabricante Alemão MAN Nutzfahrzeuge AG. O referido veículo concluído em 2000 foi incorporado no projecto Bavarian, possui uma tara de 18t e um consumo de 12 kg de H₂ aos 100km. O H₂ comprimido é armazenado a 250 bar em cilindro com capacidade até 30kg de H₂ [90].

Para efectuar uma análise comparativa dos valores de consumo dados pelo modelo MACV2H₂ e os apresentados considerou-se uma gama de velocidades urbanas, que se encontram presentes no quadro seguinte. A velocidade do cenário 1 foi seleccionada uma vez que foi a velocidade média registada pelo Mercedes Citaro na cidade do Porto ao abrigo do projecto CUTE [44]. A velocidade do terceiro cenário corresponde à velocidade média registada no projecto CUTE [45]. A velocidade do segundo cenário é um valor intermédio entre os apresentados para os outros dois cenários. Os resultados foram ainda obtidos para um autocarro urbano com tara entre os 15t e os 18t de norma EURO III com carga de 100% (Quadro 56).

Quadro 56 – Comparação do consumo do MAN NL 263 FC com os dados do modelo MACV2H₂.

	MAN NL 263 FC	Cenário 1 V=8,9 km/h	Cenário 2 V=10 km/h	Cenário 3 V=13,6 km/h
Consumo [kg_{H2}/100km]	12	12,97	12,42	10,85
Δ		8,1%	3,5%	-9,6%

No caso do cenário 1 e 2 verifica-se que as variações entre o consumo apresentado pelo modelo e o consumo do veículo são inferiores a 10% (8,1% no cenário 1 e 3,5% no cenário 2), apresentando o modelo valores de consumo superiores aos do veículo. No terceiro cenário o modelo apresenta um consumo de H₂ inferior ao do veículo, contudo, a variação é inferior aos 10% (9,6%).

Por análise dos resultados de calibração apresentados anteriormente, verifica-se que o modelo MACV2H₂ apresenta resultados coerentes comparativamente com os dados de consumos de veículos ligeiros de passageiros e motociclos com cilindrada inferior a 50 cm³ a H₂ já existentes. Relativamente aos veículos pesados de passageiros, o modelo apresenta variações superiores, apesar de serem inferiores aos 10% (com excepção do Mercedes Citaro). Relativamente ao MAN NL 263 FC há uma maior proximidade dos valores de consumo do modelo com os reais. No entanto no caso do Mercedes Citaro de 2002 que circulou na cidade do Porto há uma grande discrepância, muito por causa da limitação do modelo em simular a inclinação da via.

5.2. Análise de ciclo de vida do hidrogénio

Nesta secção será efectuada uma análise de ciclo de vida do H₂ WTP e WTW. Nestas análises será incluída a produção do H₂ por electrólise, por reformação a vapor do GN e por gaseificação do carvão e da biomassa. O local de produção, ou seja, se o H₂ é produzido em estações de reabastecimento ou em plantas centralizadas também será ponto de análise. Para efectuar o estudo considerou-se uma viagem de Lisboa ao Porto, mais propriamente com origem junto ao oceanário de Lisboa e destino na casa da musica do Porto. O percurso, segundo o *Google maps*, possui uma distância total de 310 km, sendo 97,9% do percurso realizado em auto-estrada e os restantes 2,1% em zona urbana. A velocidade média da viagem a simular (108 km/h) corresponde assim a uma ponderação entre o percurso efectuado em auto-estrada e em zona urbana. No caso da análise WTW será utilizado um veículo ligeiro de passageiros, descrito posteriormente.

De seguida serão explicados os pressupostos para as análises de ciclo de vida do H₂ efectuadas. No entanto, antes disso, resta salientar que o transporte de camiões é efectuado com veículos pesados de mercadorias de norma EURO IV e com uma tara entre 28t e 32t. O veículo circula a uma velocidade média de 50 km/h, sendo que na viagem de ida o factor de carga é 100% e na de retorno é 0%. Os petroleiros e os navios de transporte de combustíveis e matérias-primas efectuam a viagem de ida com um factor de carga de 80%, sendo que na viagem de retorno o factor de carga é de 60%. De salientar ainda que a velocidade média dos petroleiros é de 30 km/h e dos navios é de 8 km/h. Estes dados são inseridos na folha de cálculo “Dados de Entrada” no quarto ponto.

Relativamente à extracção de crude e produção de combustíveis derivados do crude manteve-se os pressupostos apresentados na folha de cálculo “Petróleo” (secção 4.5.5).

O mesmo facto acontece no caso da extracção e processamento do GN, do Carvão e produção de etanol, em que os pressupostos se encontram nas folhas de cálculo “GN”, “Carvão” e “Etanol” (secção 4.5.6, 4.5.7 e 4.5.8 respectivamente).

No caso da electricidade os dados apresentados na secção 4.5.9 correspondem ao sistema electroprodutor de Portugal. Sendo assim os valores apresentados foram mantidos na análise efectuada. Os consumos energéticos e factores de emissão associados à produção de electricidade incluindo a produção dos painéis fotovoltaicos e das torres eólicas encontram-se presentes nas secções 4.5.10 e 4.5.11 respectivamente.

Nas folhas de cálculo “Hidrogénio”, “Fertilizantes” e “Compressão” foram mantidos os dados apresentados respectivamente nas secções 4.5.12, 4.5.13 e 4.5.14.

Contudo na folha de cálculo “Transporte” para além dos dados referidos na secção 4.5.15, teve que se equacionar o local de importação de cada combustível e matéria-prima. De seguida será descrito o local de importação dos combustíveis e matérias-primas, com as respectivas distâncias. No entanto antes disso é necessário definir o local de produção de H_2 . Sendo assim considerou-se que as plantas centralizadas de produção de H_2 se encontram na refinaria de Sines. No caso da produção de H_2 em estações de reabastecimento, considerou-se que esta é efectuada na estação de reabastecimento junto ao Oceanário de Lisboa.

O transporte em gasoduto com excepção do GN foi considerado em 147 km, uma vez que é o único gasoduto multi-produto existente em Portugal e liga Sines a Aveiras [91]. A importação de GN por Portugal é efectuada essencialmente da Argélia e da Nigéria [92]. Em Portugal a extensão de gasoduto a GN é de 1441 km [93]. A extensão do gasoduto de transporte de GN no exterior de Portugal é apresentada no quadro seguinte.

Quadro 57 – Extensão do gasoduto a GN no exterior de Portugal desde a Argélia [94].

	Extensão [km]
Argélia (desde Sonatrach)	530
Marrocos	525
Estreito de Gibraltar	45
Espanha	513

Deste modo, a distribuição de GN em Portugal, considerando a importação da Argélia, é efectuada em gasoduto com extensão de 3054 km. Até Sines o gasoduto apresenta uma extensão de 2130 km.

As importações de petróleo bruto têm origem essencialmente na Arábia Saudita, na Argélia, na Nigéria e na Líbia [92]. Nas simulações efectuadas a importação foi considerada da Arábia Saudita. No caso do carvão, as importações ocorrem essencialmente da Colômbia e da África do Sul [92]. Para efeitos de simulação considerou-se a importação de carvão da Colômbia. No quadro seguinte são apresentadas as distâncias percorridas pelos navios e petroleiros de importação. De

salientar que as distâncias mencionadas foram obtidas com recurso ao software NETPAS 2.5 [70].

Quadro 58 – Distância e meio de importação do petróleo bruto e do carvão.

	Meio de Transporte	Origem	Distância [km]
Petróleo	Petroleiro	Arábia Saudita	9884
Carvão	Navio	Colômbia	8471

Contudo a produção de derivados do crude por parte da Galp, não é suficiente para suprir as necessidades em Portugal. Deste modo existe a necessidade de recorrer a importação de derivados do crude, como o caso da gasolina, do gasóleo e do GPL. As importações são efectuadas dos Estados Unidos da América de petroleiro, sendo que o refinado com maior necessidade de importação é a gasolina [95]. Segundo o software NETPAS 2.5 [70] o porto de Houston (EUA) dista de 8467 km do porto petrolífero de Sines.

Para o transporte de fertilizantes, tomou-se como referência a empresa “deiba”. A empresa que comercializa fertilizantes, localiza-se junto ao porto de Setúbal e efectua importações dos maiores exportadores mundiais de fertilizantes [96]. Deste modo, com recurso ao “FAOSAT” procurou-se os países que exportavam em maior quantidade cada um dos fertilizantes, herbicidas e insecticidas [97]. Os países do qual ocorre a importação encontram-se descritos no quadro seguinte. Nesse quadro é descrito também a distância que o navio de transporte terá que percorrer até ao porto de Setúbal, valores obtidos por recurso ao software NETPAS 2.5 [70].

Quadro 59 – Local de importação de fertilizantes, herbicidas e insecticidas.

	País de origem	Distância [km]
Amónia	Brasil	9314
Ureia	China	16118
Ácido Nítrico	Rússia	19009
Nitrato de Amónia	Rússia	19009
Ácido sulfúrico	Estados Unidos da América	8467
Rocha fosfórica	Brasil	9314
Ácido fosfórico	Estados Unidos da América	8467
K₂O	Canadá	5476
CaCO₃	Malásia	13016
Herbicidas	França	1704
Insecticidas	Estados Unidos da América	8467

Posteriormente o restante transporte dos fertilizantes, herbicidas e insecticidas é efectuado por camião. O transporte é efectuado num percurso de 300 km, uma vez que é a distância que liga Sines e Setúbal, de acordo com o *Google maps*. Os restantes combustíveis e matérias-primas transportados por camião percorrem 160 km. Esta distância corresponde ao percurso que liga a refinaria de Sines e a estação de reabastecimento junto ao Oceanário de Lisboa. O comprimento do percurso foi obtido por recurso ao *Google maps*.

• Análise WTP

Neste ponto será abordada uma análise do consumo energético e das emissões de poluentes (VOC, CO, PM, NO_x e GEE) desde a produção dos combustíveis até à sua disponibilização no posto de reabastecimento. De salientar que os resultados obtidos são relativos ao PCI dos combustíveis. Os processos de liquefacção e de compressão utilizam electricidade do sistema electroprodutor nacional. A figura seguinte apresenta o consumo energético total, comparando deste modo, os combustíveis convencionais com os vários tipos de G.H₂ considerados.

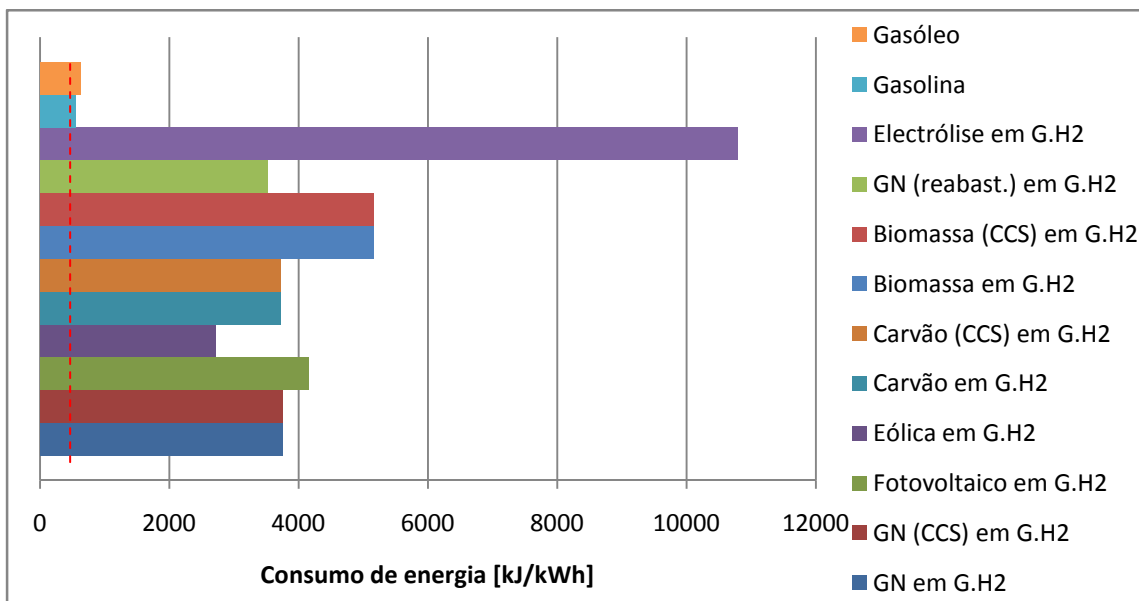


Figura 46 – Comparação dos consumos energéticos totais WTP (com G.H₂).

Na Figura 46 pode-se observar a grande diferença entre o consumo energético essencial para a produção e distribuição dos combustíveis convencionais (gasolina e gasóleo) e o G.H₂ produzido pelas diversas formas consideradas. A linha a tracejado vermelho na Figura 46 representa o consumo energético para produção e distribuição da gasolina, marcada desta forma como cenário de referência. Verifica-se que o G.H₂ produzido por electrólise recorrendo à electricidade do sistema electroprodutor nacional é o que apresenta maior consumo energético total, sendo este 19,8 vezes superior ao consumo energético da gasolina. O G.H₂ produzido por electrólise com electricidade produzida por energia eólica é o que apresenta menor consumo energético total, ainda assim apresenta um consumo energético 5 vezes superior ao da gasolina. Este facto deve-se em grande parte ao elevado consumo energético dos processos de compressão e de transporte do H₂ (como se pode observar da Figura 50 à 55).

No entanto, como algumas formas de produção de G.H₂ são por recurso a energia renovável, de seguida apresentar-se-á uma comparação do consumo de energia fóssil.

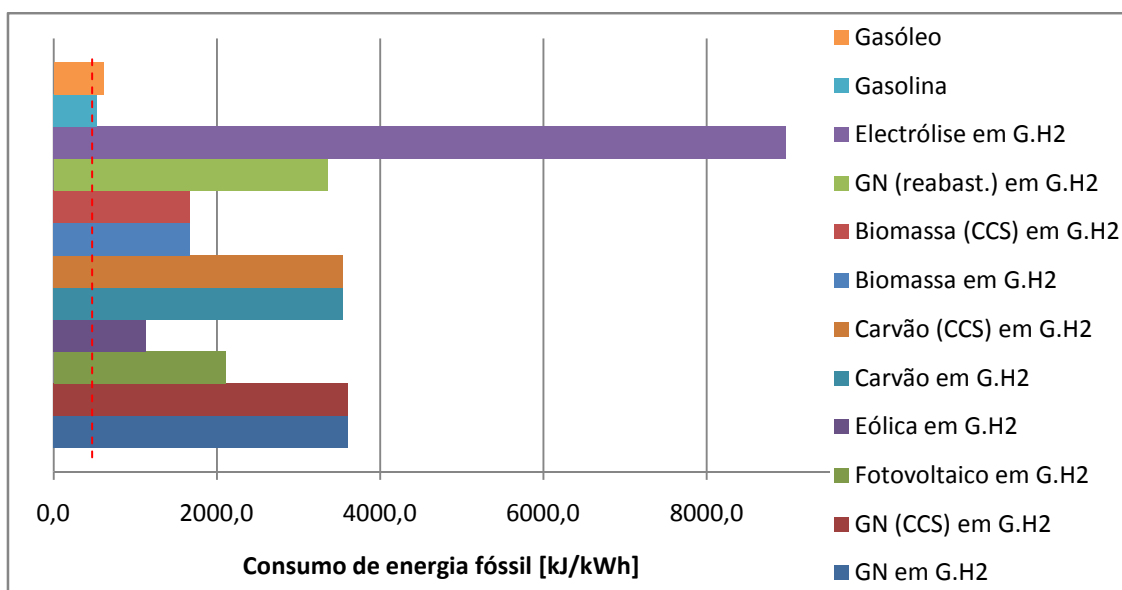


Figura 47 – Comparação dos consumos energia fóssil WTP (com G.H₂).

Analisando o consumo de energia fóssil (Figura 47), em vez do consumo de energia total, verifica-se uma grande redução do consumo energético em algumas formas de produção de G.H₂, com especial enfoque, no G.H₂ produzido por gaseificação da biomassa e por electrólise com a electricidade produzida por energia eólica e por fotovoltaica. A electrólise com electricidade do sistema electroprodutor nacional para produção de G.H₂ é a que apresenta maior consumo de energia fóssil. A produção de electricidade em Portugal é muito dependente da queima de combustíveis fósseis, cerca de 65% do total da electricidade [4]. Como a eficiência das tecnologias de combustão é baixa gera um elevado rácio entre o consumo de energia e a energia eléctrica produzida. Este factor explica os elevados consumos energéticos do G.H₂ produzido por electrólise com electricidade do sistema electroprodutor nacional. A electricidade oriunda da energia eólica para produção de G.H₂ por electrólise é a forma de produção de G.H₂ que apresenta menor consumo de energia fóssil, contudo o consumo apresentado é duas vezes superior ao da gasolina.

Ao analisar as Figuras 46 e 47 verifica-se uma grande diferença entre o consumo de energia total e o consumo de energia fóssil do G.H₂ produzido por gaseificação da biomassa. Este apresenta um consumo de energia total elevado (5153 kJ/kWh), sendo mesmo, depois do G.H₂ produzido por electrólise com electricidade do sistema electroprodutor nacional, o que apresenta maior consumo energético. No entanto desse valor apenas 32% corresponde a combustíveis fósseis, apresentando mesmo um consumo de energia fóssil menor que o G.H₂ produzido por electrólise com electricidade oriunda de painéis fotovoltaicos.

De seguida será apresentada uma análise em termos dos consumos energéticos mas comparando os combustíveis convencionais com L.H₂ (Figura 48).

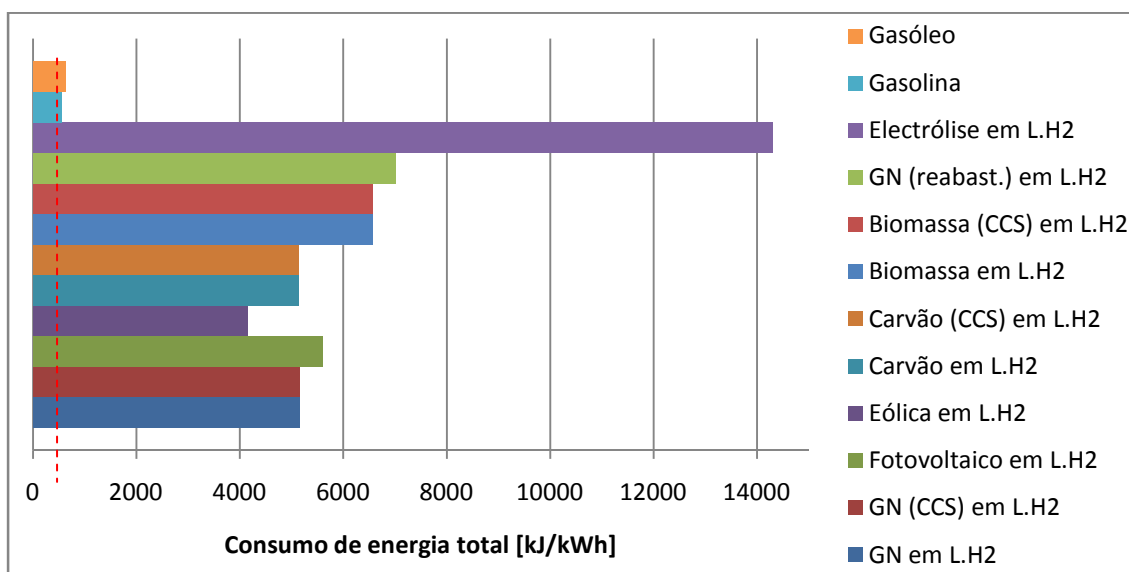


Figura 48 – Comparação dos consumos energéticos totais WTP (com L.H₂).

Ao observar a figura anterior verifica-se a mesma tendência que acontecia no caso da produção e distribuição de G.H₂. Ou seja, consumos energéticos muito superiores aos dos combustíveis convencionais, sendo que o H₂ produzido por electrólise do sistema electroprodutor nacional é o que apresenta maior consumo energético e o produzido por electrólise da electricidade oriunda da energia eólica o que apresenta menor consumo energético. Contudo facilmente se percebe ao analisar as Figuras 46 e 48 que a produção de L.H₂ requer maior consumo energético que a produção de G.H₂. Em média a produção e distribuição de L.H₂ apresentou consumos energéticos 1,4 vezes superior à produção e distribuição de G.H₂. De seguida analisar-se-á o consumo de energia fóssil na produção e distribuição de L.H₂ para verificar se a tendência se mantém.

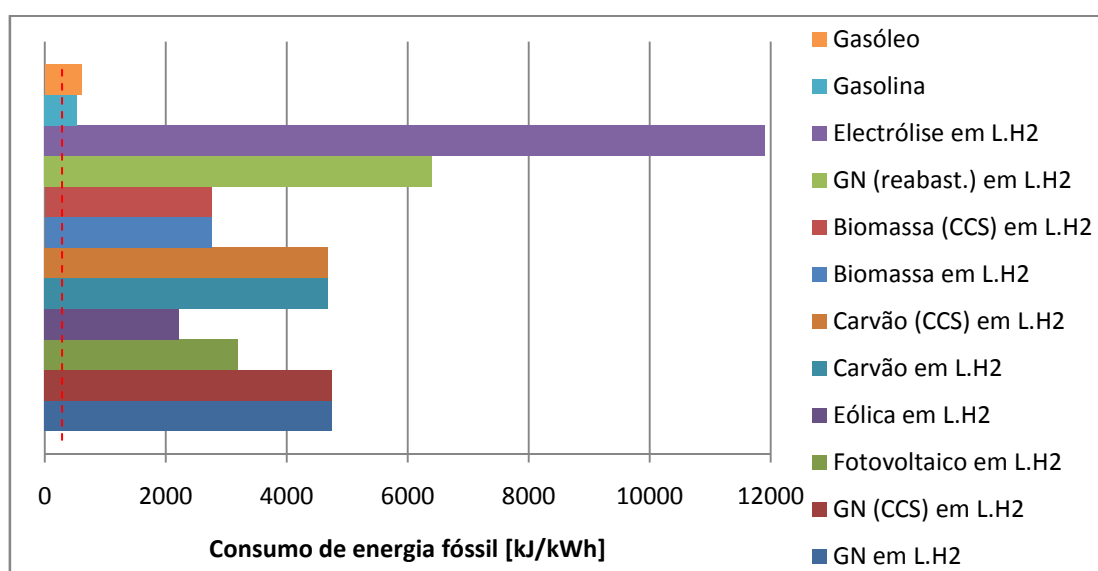


Figura 49 – Comparação dos consumos energia fóssil WTP (com L.H₂).

De facto a tendência demonstrada mantém-se. A electricidade produzida por energia eólica para originar L.H₂ por electrólise é a que apresenta menor consumo de energia

fóssil e o L.H₂ originário da electrólise com electricidade do sistema electroprodutor o que apresenta maior consumo de energia fóssil. Qualquer um dos valores é superior ao consumo de energia fóssil para produção e distribuição da gasolina, sendo 4 vezes superior o L.H₂ oriundo da energia eólica e 22 vezes superior o L.H₂ oriundo da electrólise da electricidade do sistema electroprodutor nacional.

Verifica-se que para as condições analisadas o H₂ (WTP) é sempre pior que a gasolina e o gasóleo. De maneira a verificar qual o processo que apresenta o maior consumo energético na produção e distribuição de H₂ e verificar a diferença de consumos energéticos entre o G.H₂ e o L.H₂, efectuar-se-á uma análise detalhada por etapa.

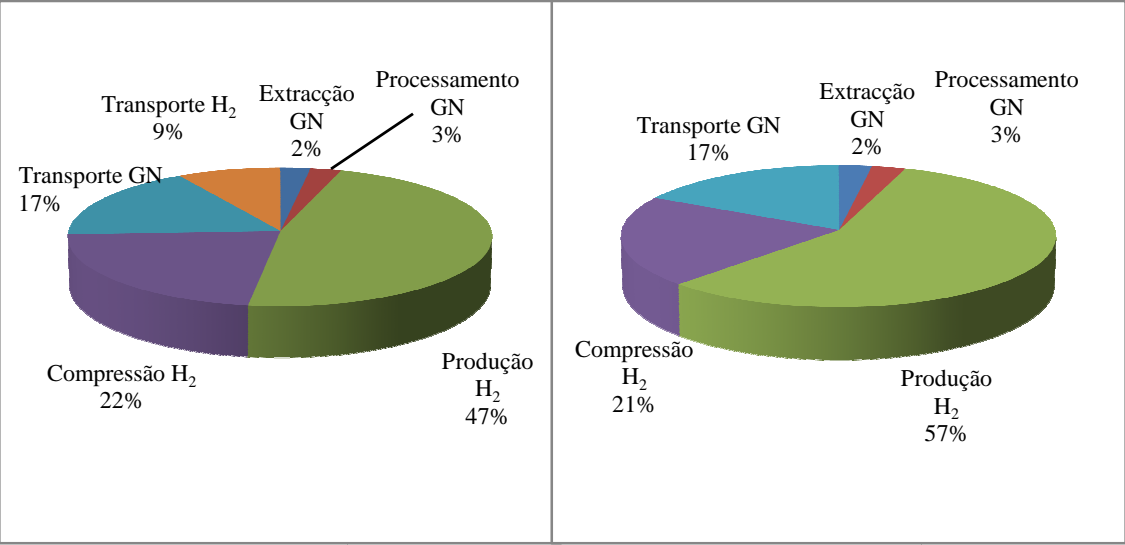


Figura 50 – Rácio do consumo de energia para produção de G.H₂ por GN.

Figura 51 – Rácio do consumo de energia para produção de G.H₂ por GN (estações).

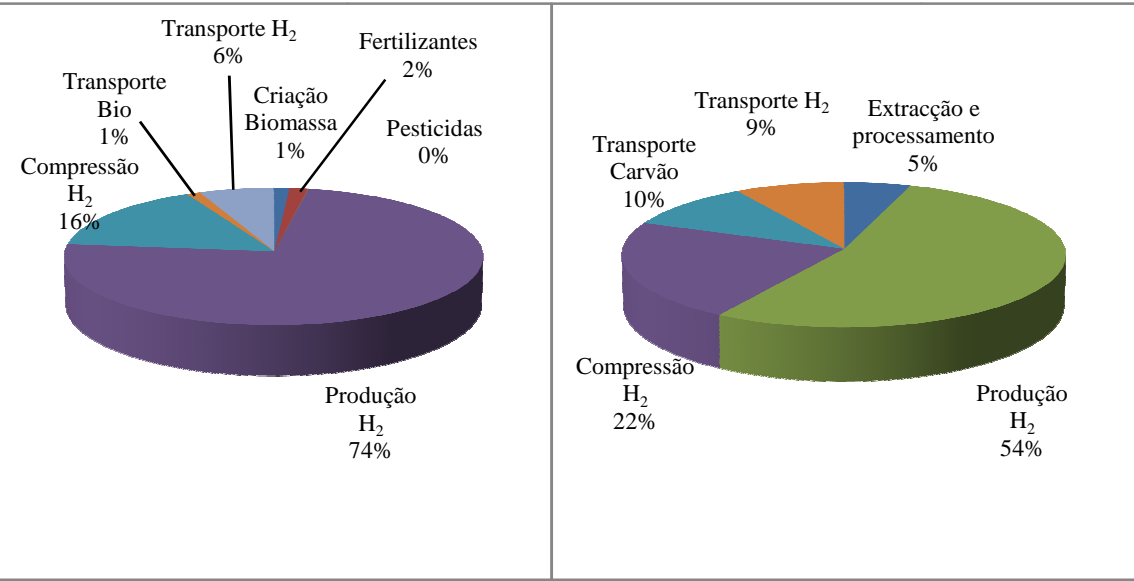


Figura 52 – Rácio do consumo de energia para produção de G.H₂ por Biomassa.

Figura 53 – Rácio do consumo de energia para produção de G.H₂ por Carvão.

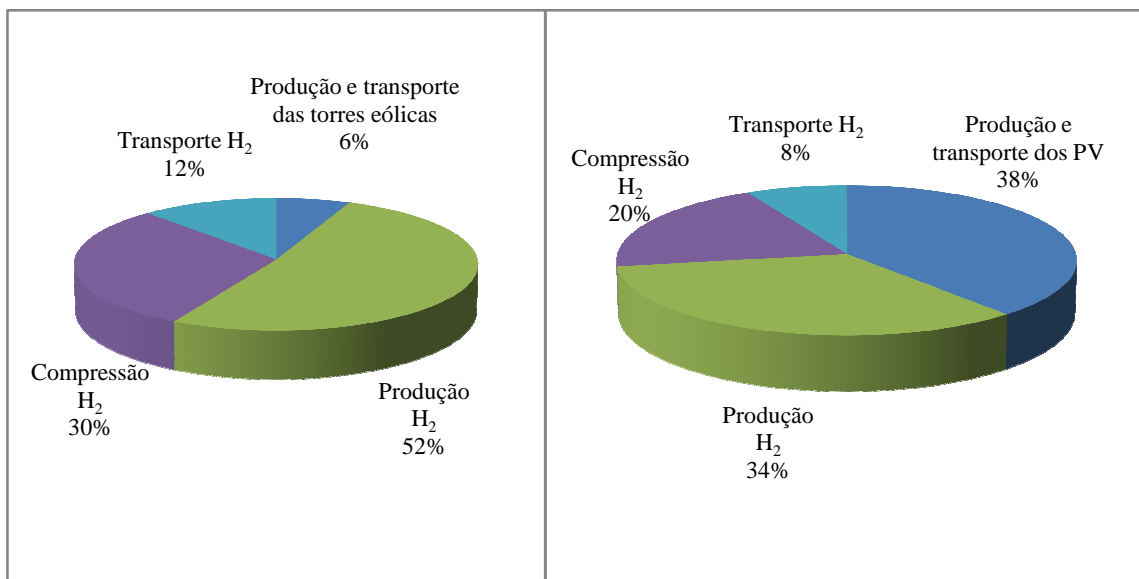


Figura 54 – Rácio do consumo de energia para produção de G.H₂ por energia eólica. **Figura 55** – Rácio do consumo de energia para produção de G.H₂ por PV.

Na produção e distribuição de G.H₂ o processo de produção, independentemente da forma de produção, tem um peso importante no consumo energético total, facto que pode ser verificado da Figura 50 à 55.

No caso do G.H₂ produzido por reformação a vapor de GN, quer em plantas centralizadas quer em estações de reabastecimento, o processo de produção do H₂ corresponde a cerca de metade do consumo de energia total para a produção e distribuição do G.H₂ (47% em plantas centralizadas e 57% em estações de reabastecimento) (ver Figuras 50 e 51. Nas referidas figuras verifica-se também que os processos de extracção e de processamento do GN têm pouca influência no consumo de energia total para produção e distribuição do G.H₂, ou seja, os dois processos representam 5% do consumo energético total.

Ao analisar a Figura 52, verifica-se que apesar de alguma incerteza no local de importação dos fertilizantes, os fertilizantes e pesticidas representam uma fracção mínima do consumo energético da produção e transporte de G.H₂ por gaseificação da biomassa. De salientar ainda que os 0% e 2% do consumo energético total (Figura 52), incluem o transporte e a produção dos pesticidas e dos fertilizantes respectivamente. Um facto que se verifica é o processo de produção de H₂ por recurso a gaseificação da biomassa, ser o que apresenta maior percentagem do consumo total de energia na análise WTP do H₂. Contudo apenas 12% desse valor corresponde a energia fóssil.

O rácio do consumo energético de cada um dos processos, no consumo de energia total WTP do H₂ por recurso à gaseificação do carvão é semelhante ao rácio do H₂ da reformação do GN (ver Figuras 50 e 53). O próprio consumo energético WTP é semelhante. Apesar do processo de transporte do carvão representar menor consumo energético que o transporte do GN, o processo de produção de H₂ por gaseificação do carvão implica maior consumo de energia que a reformação a vapor do GN.

A Figura 54 e a Figura 55 podem ser analisadas conjuntamente, pois correspondem a energias renováveis para produção de H₂. Apesar do processo de produção de H₂ representar uma grande fatia no consumo energético (sendo mesmo a maior no H₂ por

energia eólica), toda esta energia é renovável. Deste modo, o processo com maior consumo energético na produção de G.H₂ por electrólise com electricidade oriunda da energia eólica, é a compressão do H₂. A compressão é efectuada por recurso a electricidade do sistema electroprodutor nacional. A grande diferença, entre a energia eólica e a solar fotovoltaica, no consumo de energia total WTP do G.H₂, reside na grande necessidade energética para produção dos painéis fotovoltaicos. A produção dos painéis fotovoltaicos corresponde a 59% do consumo total de energia (WTP) do G.H₂ produzido por electrólise com electricidade proveniente da energia eólica.

De seguida será apresentada uma análise semelhante mas para o L.H₂, de forma a entender a diferença existente entre o consumo de energia (WTP) do G.H₂ e do L.H₂.

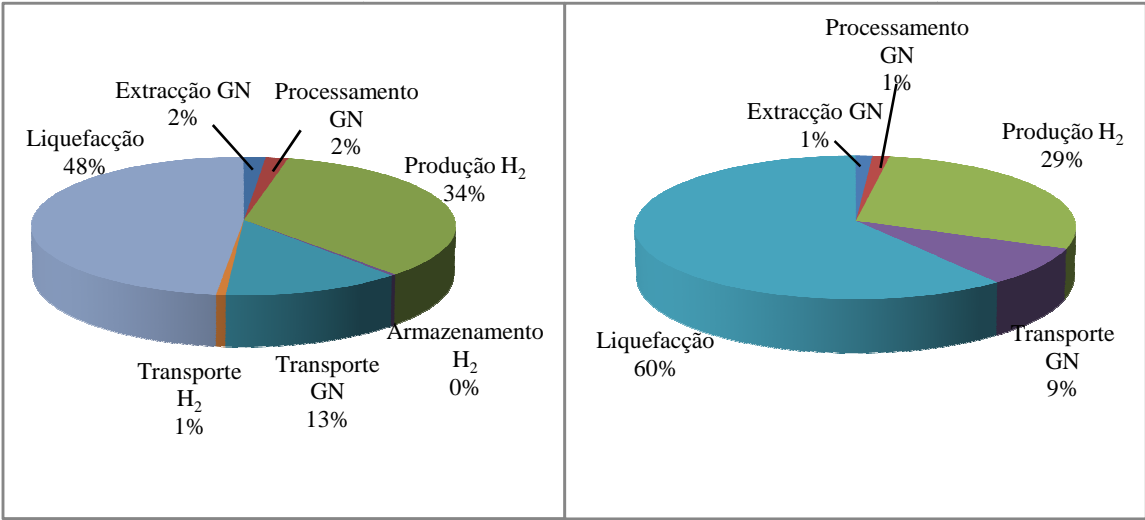


Figura 56 – Rácio do consumo de energia para produção de L.H₂ por GN.

Figura 57 – Rácio do consumo de energia para produção de G.H₂ por GN (estações).

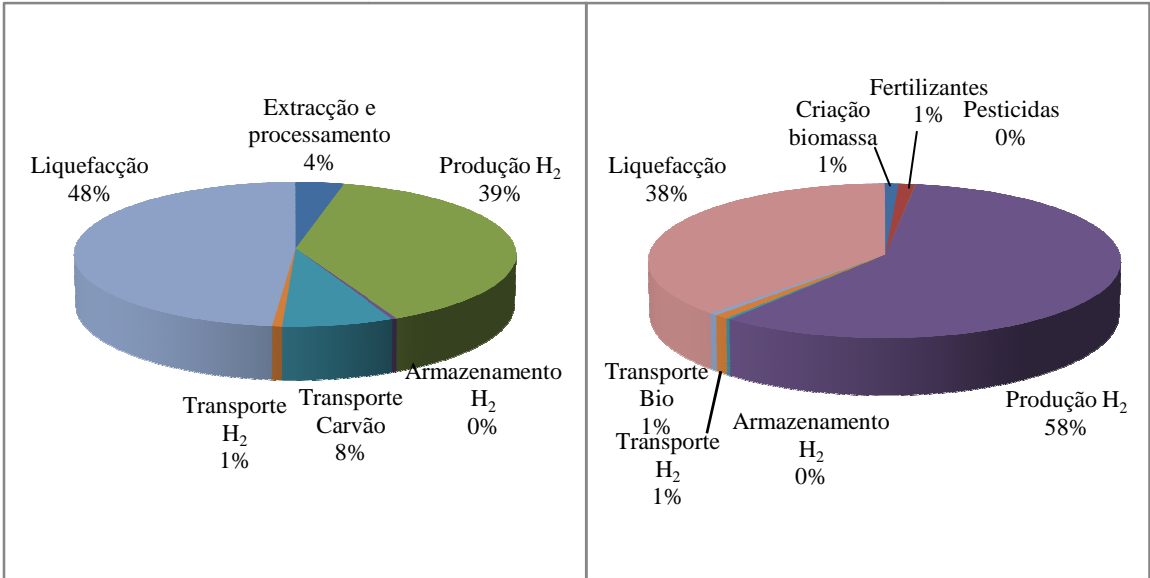


Figura 58 – Rácio do consumo de energia para produção de L.H₂ por Carvão.

Figura 59 – Rácio do consumo de energia para produção de L.H₂ por Biomassa.

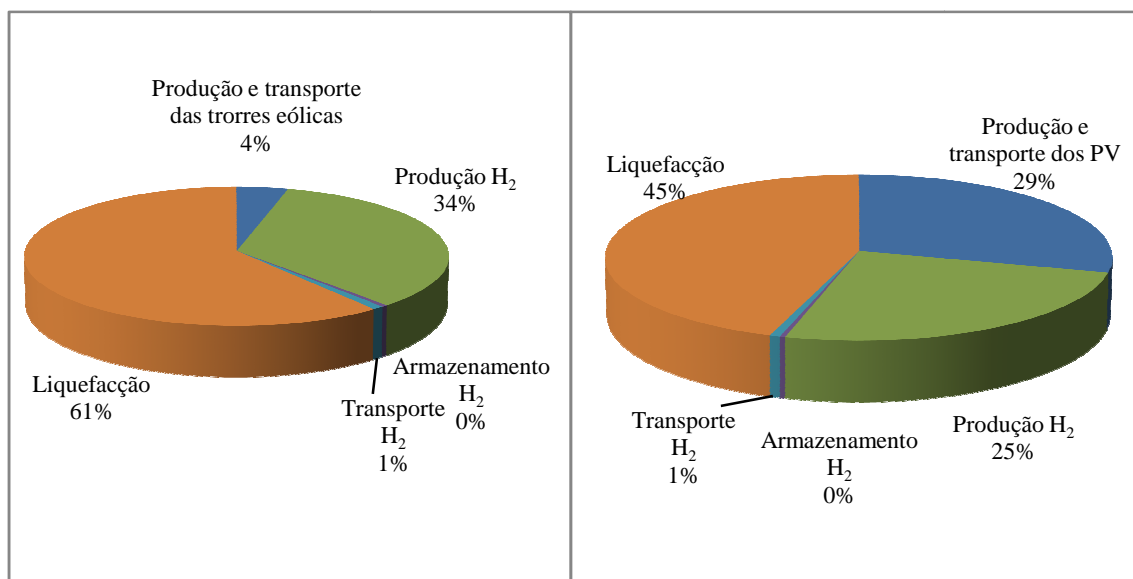


Figura 60 – Rácio do consumo de energia para produção de L.H₂ por energia eólica.

Figura 61 – Rácio do consumo de energia para produção de L.H₂ por PV.

A diferença entre a fracção que cada processo ocupa no consumo de energia total (WTP) do H₂ por reformação do GN em estações de reabastecimento e em plantas centralizadas é mais notória na produção de L.H₂ do que em G.H₂. Apesar do processo de liquefacção ser o que representa maior percentagem no consumo de energia total quer em L.H₂ produzido em estações de reabastecimento quer no produzido em plantas centralizadas por reformação do GN, nas estações a liquefacção requer um consumo energético muito superior, 41% superior ao mesmo processo em plantas centralizadas. Este facto é justificado com a menor eficiência de liquefacção existente nas estações de reabastecimento relativamente às plantas centralizadas. Tal como acontece com o G.H₂, na produção de L.H₂ os processos de extracção e processamento do GN são pouco relevantes em termos de consumo energético relativamente ao consumo de energia total WTP do H₂ por reformação do GN (ver Figuras 56 e 57).

Como se pode observar na Figura 58, o processo de produção e distribuição de L.H₂ por gaseificação do carvão que requer maior consumo de energia é a liquefacção. Contudo o processo de produção apesar de representar um consumo de energia menor que a liquefacção, representa uma fatia considerável no consumo de energia total WTP (39%).

A produção de L.H₂ por gaseificação da biomassa (Figura 59) apresenta uma situação curiosa, uma vez que quase todo o consumo energético é distribuído pelos processos de produção e de liquefacção (sendo respectivamente 58% e 38%). Contudo no processo de produção de H₂ apenas 12% corresponde a energia fóssil. Os restantes processos têm influência quase irrelevante no consumo final de energia WTP.

No caso do L.H₂ por electrólise da electricidade oriunda da energia eólica liquefacção é o processo responsável por grande parte do consumo de energia (Figura 60). O processo de produção também representa uma percentagem considerável (34%), contudo este

valor corresponde apenas a energia renovável. Deste modo verifica-se que o processo de liquefacção representa quase todo o consumo de energia fóssil.

Apesar da produção dos painéis fotovoltaicos representar maior consumo energético que a produção das torres eólicas, o processo de liquefacção é também o responsável pela maior fatia do consumo de energia WTP do L.H₂ produzido por electrólise de electricidade oriunda dos painéis fotovoltaicos (Figura 61). A energia consumida no processo de produção de H₂ por electrólise com electricidade dos painéis fotovoltaicos é exclusivamente energia renovável.

Analisando os processos essenciais ao ciclo WTP do G.H₂ e do L.H₂, verifica-se que o transporte do L.H₂ representa um consumo energético muito inferior ao transporte de G.H₂. Em contrapartida o processo de liquefacção apresente um consumo de energia muito superior ao de compressão. Os valores para plantas centralizadas encontram-se no quadro seguinte.

Quadro 60 – Consumo de energia nos processos de compressão, liquefacção e transporte do H₂.

	Transporte gasoso	Transporte líquido	Compressão	Liquefacção
H ₂ [kJ/kWh]	319,1	34,2	826,2	2482,4

Os dados do Quadro 60 justificam a grande diferença entre o consumo de energia WTP do G.H₂ e do L.H₂. A diferença no consumo de energia entre a liquefacção e a compressão é 6 vezes superior à diferença entre o transporte do G.H₂ e do L.H₂. Contudo o transporte de G.H₂ é muito sensível à distância, ou seja, para percursos longos o consumo de energia no transporte vai ser grande. Este facto deve-se ao G.H₂ possuir uma densidade baixa (0,09 kg/m³), logo num dado volume a quantidade de H₂ vai ser pequena, ou por outras palavras, para transportar a mesma quantidade de H₂ que no caso do transporte de L.H₂ seria necessário um grande volume (787 vezes superior). De seguida serão apresentados os resultados WTP em termos de emissões de poluentes. Inicialmente serão apresentados os poluentes locais (CO, VOC, PM e NOx) e de seguida os GEE para a produção e distribuição até ao posto de reabastecimento de G.H₂ e de L.H₂. Por análise dos dados anteriores é esperada uma maior emissão de poluentes na produção e distribuição do L.H₂, uma vez que este requer maior consumo de energia fóssil que o G.H₂.

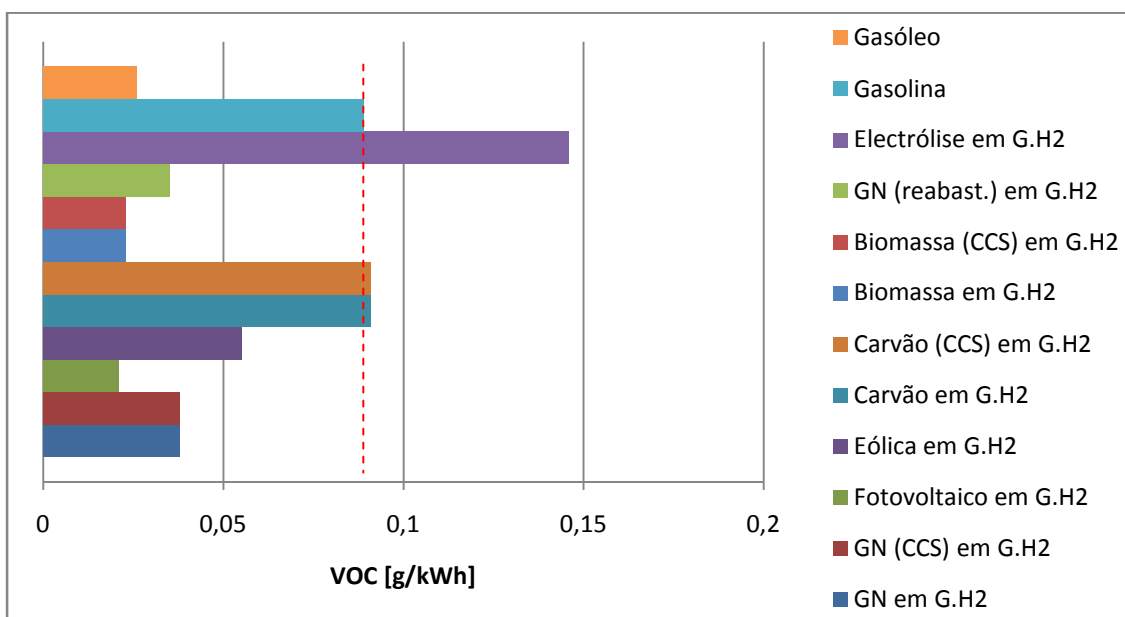


Figura 62 – Comparação da emissão de VOC numa análise WTP (com G.H₂).

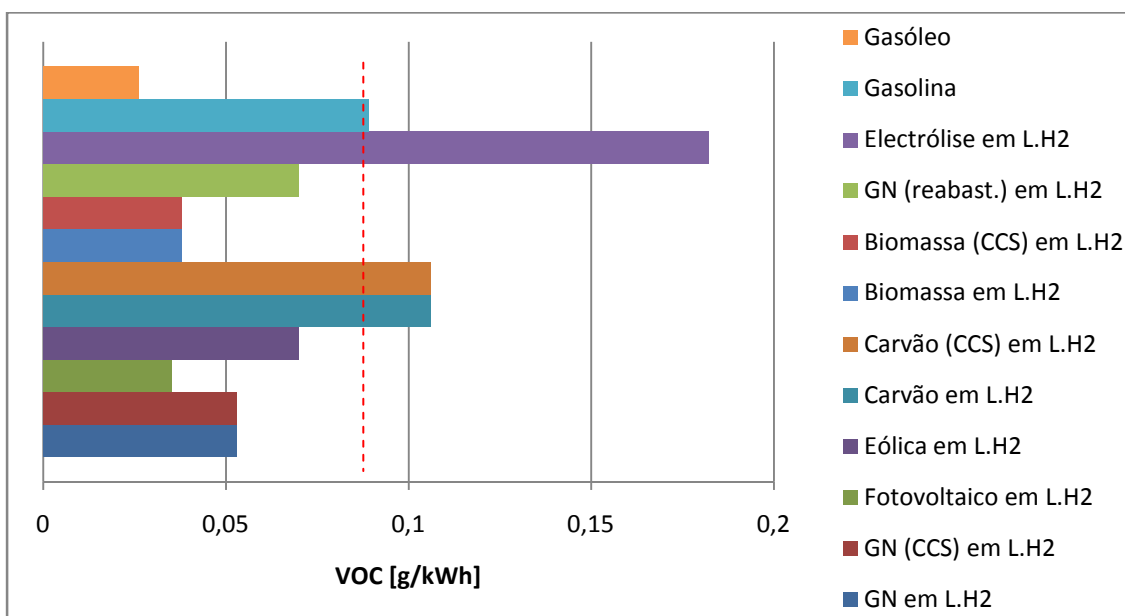


Figura 63 – Comparação da emissão de VOC numa análise WTP (com L.H₂).

De facto verifica-se que a produção e distribuição de L.H₂ apresentam maiores emissões de VOC que no caso do G.H₂ (Figuras 62 e 63). Contudo constata-se que a gasolina apresenta mais emissões que alguns tipos de H₂. O G.H₂ produzido por electrólise com electricidade proveniente dos painéis fotovoltaicos é o que apresenta menores emissões de VOC (WTP). Sendo os valores muito próximos dos do G.H₂ produzido por gasificação da biomassa e quatro vezes inferiores aos apresentados para a gasolina. Apenas a gaseificação do carvão e a electrólise com electricidade do sistema electroprodutor nacional, quer para produção de G.H₂ quer de L.H₂, apresentam valores de emissão de VOC superiores aos da gasolina, numa análise WTP. A electrólise com electricidade do sistema electroprodutor nacional para produção de L.H₂ é a que apresenta mais emissões de VOC. Na produção de G.H₂ pelo referido processo, o valor

das emissões é relativamente inferior ao do L.H₂, contudo é a forma de produção de G.H₂ com maiores emissões de VOC.

Na emissão de CO constata-se que numa análise WTP a gasolina apresenta menores emissões por unidade de energia disponível no posto de reabastecimento. Verifica-se também o facto de a produção e distribuição de L.H₂, tal como esperado, apresentar maiores emissões de CO que no caso do G.H₂ (Figuras 64 e 65). A produção de H₂ por electrólise com electricidade dos painéis fotovoltaicos é a que apresenta maiores emissões de CO, sendo os valores 68 vezes superiores aos da gasolina no caso de produção de G.H₂ e 72 vezes no caso do L.H₂. A produção de H₂ por gaseificação da biomassa é a que apresenta menores emissões de CO, ainda assim os valores são 3 vezes superiores aos da gasolina no caso da produção de G.H₂ e 6 vezes no caso de L.H₂. A produção e distribuição de L.H₂ por gaseificação da biomassa apresenta valores semelhantes aos da produção do G.H₂ por reformação a vapor do GN. Contudo é a forma de produção de L.H₂ (das analisadas) com menores emissões de CO (Figura 65).

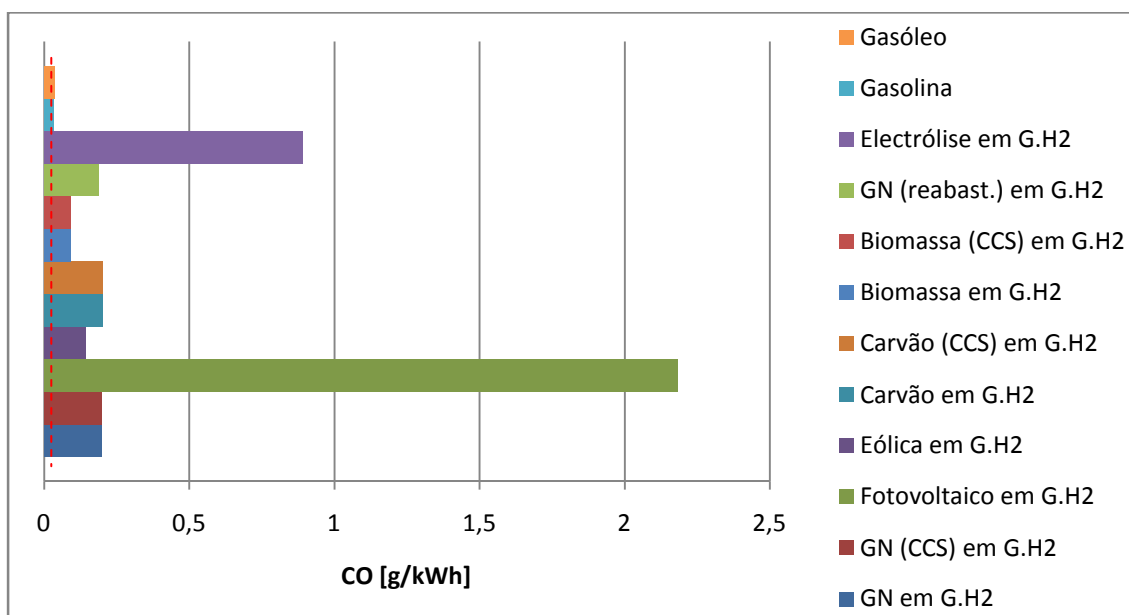


Figura 64 – Comparação da emissão de CO numa análise WTP (com G.H₂).

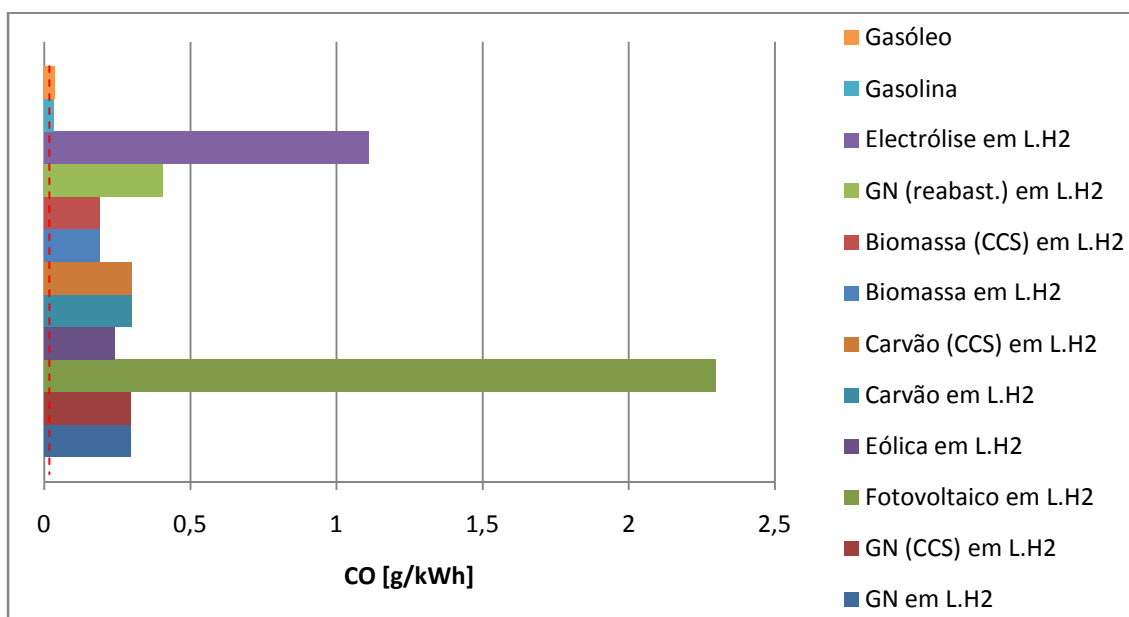


Figura 65 – Comparação da emissão de CO numa análise WTP (com L.H₂).

Tal como no VOC e no CO, a produção e distribuição do L.H₂ implica maiores emissões de NO_x por unidade de energia disponível na estação de reabastecimento do que a de G.H₂ pelo mesmo processo. Verifica-se também que a gasolina é o combustível dos analisados com menos emissões de NO_x por unidade de energia disponível, ou seja, todas as formas de produção de H₂ (gasoso ou líquido) implicam mais emissões deste poluente local do que a gasolina (Figuras 66 e 67). A electrólise com electricidade do sistema electroprodutor nacional para produção de H₂ é a que apresenta mais emissões deste poluente, apresentando valores 17 vezes superiores aos da gasolina no caso de G.H₂ e 21 vezes no caso de L.H₂. Esta situação é importante uma vez que em termos de emissões de VOC a electrólise do sistema electroprodutor nacional também é a que apresenta mais emissões. A produção de H₂ por electrólise da electricidade do sistema electroprodutor nacional apresenta um forte potencial para problemas nas vias respiratórias. A produção e distribuição de H₂ por electrólise com electricidade proveniente da energia eólica é a que apresenta menores emissões de NO_x. Contudo os valores apresentados são duas vezes superiores aos da gasolina no caso do G.H₂ e 3 vezes no caso do L.H₂. Apesar da energia eólica ser a forma de produção de L.H₂ com menores emissões de NO_x, os valores são superiores aos da produção de G.H₂ pelo mesmo processo e até mesmo que aos da gaseificação da biomassa e aos da electrólise com electricidade dos painéis fotovoltaicos (Figuras 66 e 67).

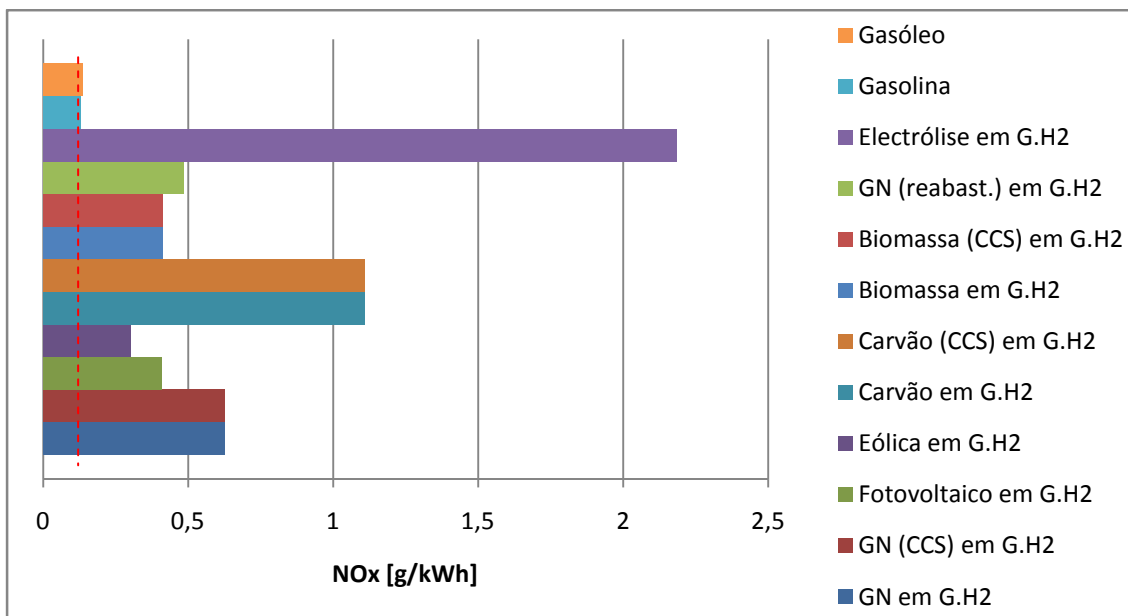


Figura 66 – Comparação da emissão de NO_x numa análise WTP (com G.H₂).

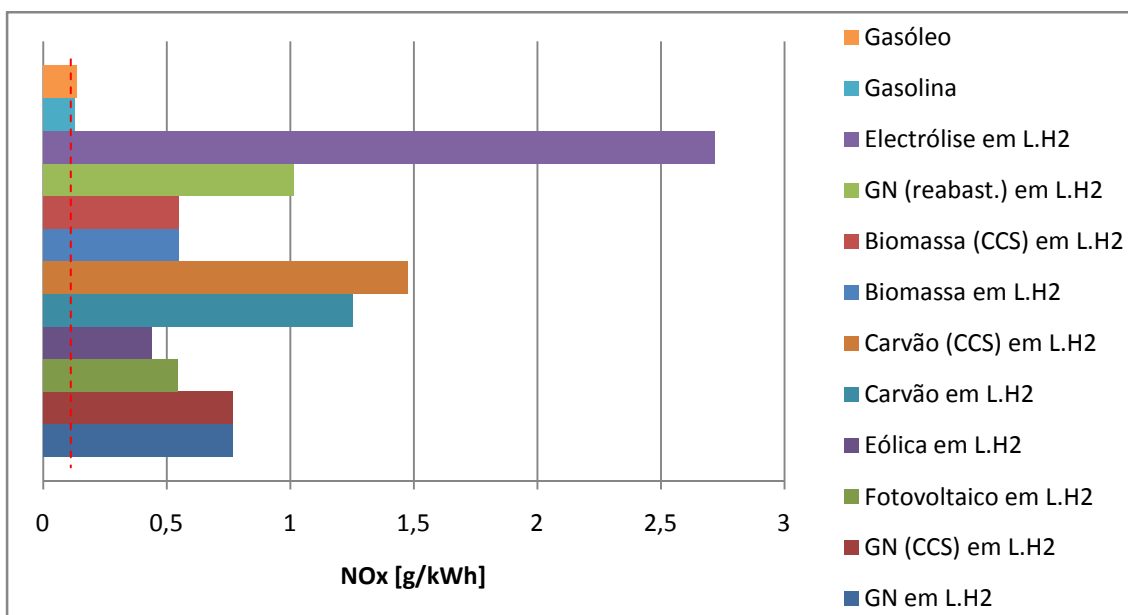


Figura 67 – Comparação da emissão de NO_x numa análise WTP (com L.H₂).

Em relação às PM, acontece algo semelhante aos poluentes locais referidos anteriormente, ou seja, a produção de L.H₂ apresenta maiores emissões de PM por unidade de energia disponível no posto de reabastecimento que a de G.H₂ pelos mesmos processos (Figuras 68 e 69). Um facto curioso ao analisar as Figuras 68 e 69 é que, apesar dos painéis fotovoltaicos serem considerados uma fonte renovável para produção de energia, a produção e distribuição de H₂ por electrólise da electricidade oriunda dos painéis apresenta mais emissões de PM que o H₂ produzido por gaseificação da biomassa e até mesmo que o H₂ produzido reformação a vapor do GN. Este facto deve-se às necessidades energéticas para produção dos painéis fotovoltaicos e das emissões que estas implicam. No entanto a produção e distribuição de H₂ que apresenta maiores emissões de PM é a gaseificação do carvão, sendo que os valores das emissões de PM

são 49 vezes superiores aos apresentados pela gasolina para G.H₂ e 54 vezes para o L.H₂. A produção e distribuição de H₂ por recurso à electrólise da electricidade do sistema electroprodutor nacional apresenta valores muito próximos dos da gaseificação do carvão. O H₂ produzido por electrólise com electricidade proveniente da energia eólica é a forma de produção de H₂ (das analisadas) que apresenta menos emissões de PM por unidade de energia disponível no posto de reabastecimento (Figuras 68 e 69). Contudo os valores são 3 vezes superiores aos da gasolina no caso do G.H₂ e 8 vezes no caso de L.H₂, sendo que a gasolina é o combustível analisado que apresenta menos emissões de PM por unidade de energia disponível no posto de reabastecimento.

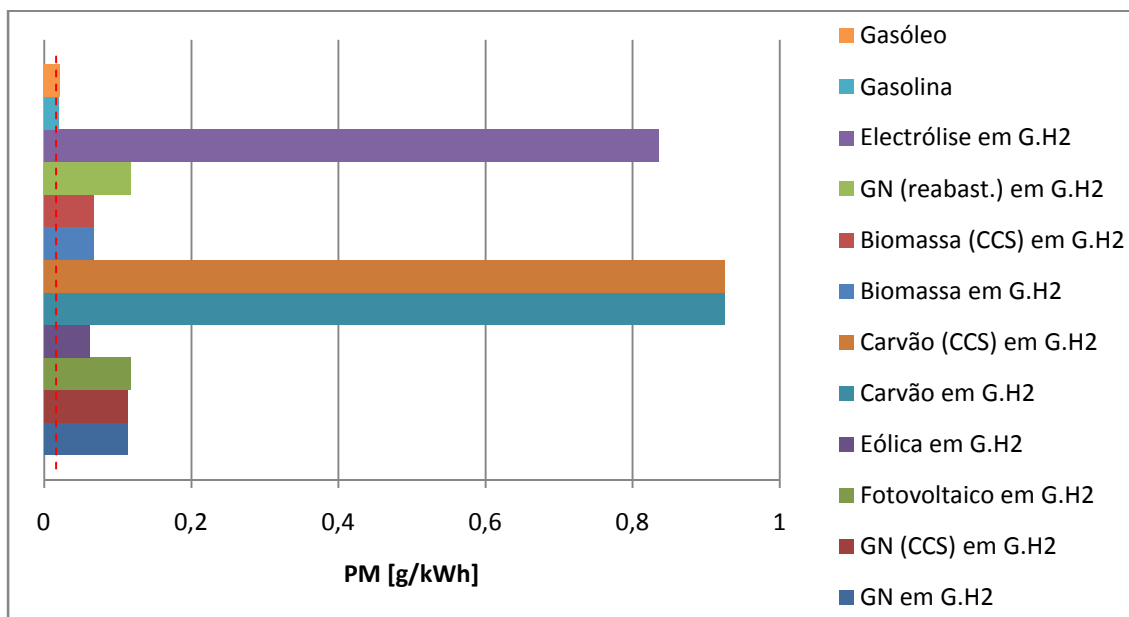


Figura 68 – Comparação da emissão de PM numa análise WTP (com G.H₂).

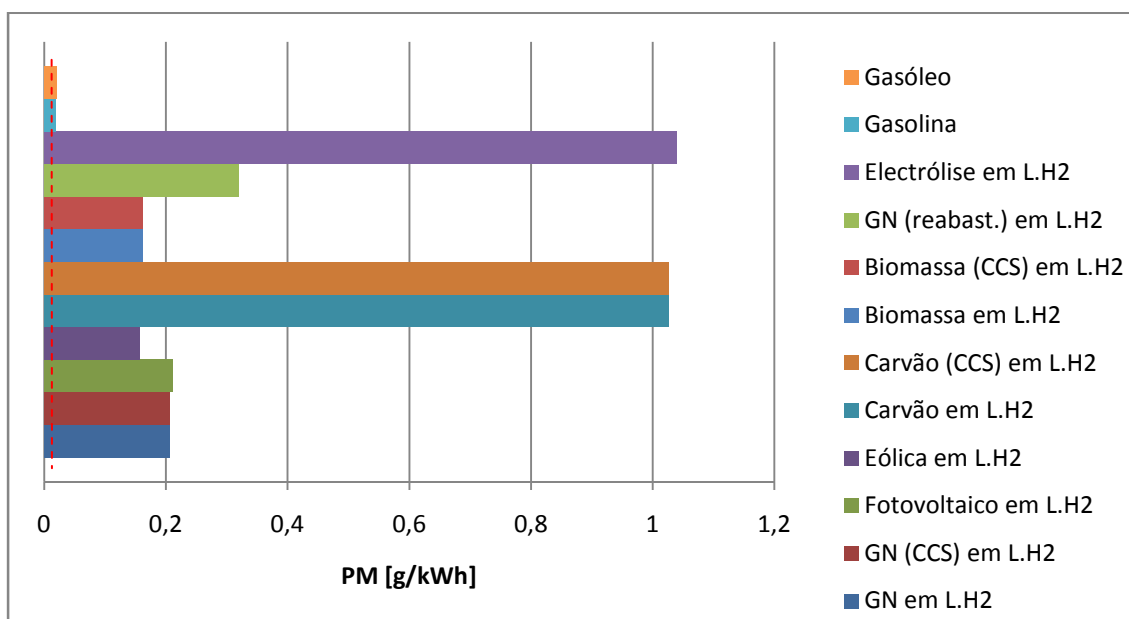


Figura 69 – Comparação da emissão de PM numa análise WTP (com L.H₂).

De seguida a análise será efectuada em termos de poluentes globais. A análise não será efectuada em termos de CO₂, mas sim de GEE, uma vez que para além do CO₂ engloba

outros poluentes globais como o CH_4 e o N_2O , de acordo com o PAG referido no Quadro 11.

Tal como nos poluentes locais, constata-se que a produção e distribuição de L.H_2 proporciona maiores emissões de GEE do que a produção de G.H_2 pelo mesmo processo (ver Figura 70 e 71). Como exemplificado anteriormente, a liquefacção requer muita energia, sendo que essa energia é a electricidade do sistema electroprodutor nacional. Como a produção de energia eléctrica em Portugal recorre muito à queima de combustíveis e como a eficiência das tecnologias de combustão é baixa, o rácio entre o consumo de energia e a energia eléctrica produzida é elevado. Este facto proporciona não só um elevado consumo energético para produção da electricidade como elevadas emissões de poluentes, como é o caso dos GEE.

Dos combustíveis analisados a gasolina é o que apresenta menores emissões de GEE por unidade de energia disponível na estação de reabastecimento ($45 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$), sendo que o gasóleo apresenta um valor próximo ($51 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$). O H_2 apresenta uma grande diversificação de valores, que variam desde os $107 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$ aos $1021 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$ no caso de G.H_2 ou desde os $202 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$ aos $1271 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$ no caso de L.H_2 (Figuras 70 e 71). A produção de H_2 por electrólise com electricidade 100% proveniente da energia eólica é a forma que apresenta menores emissões de GEE. Em contra partida a produção de H_2 por electrólise com electricidade do sistema electroprodutor nacional é a que apresenta mais emissões de GEE. Este facto demonstra que a electrólise tanto pode ser a melhor como a pior forma de produção de H_2 em termos de GEE.

A utilização da tecnologia CCS apresenta-se vantajosa para os processos onde é aplicada. A produção de H_2 por reformação a vapor do GN ou por gaseificação do carvão com a tecnologia CCS, apresenta valores de emissão de GEE próximos dos da produção de H_2 por electrólise com electricidade proveniente dos painéis fotovoltaicos, sendo nesta última a produção de energia uma fonte renovável. A gaseificação da biomassa com CCS para produção de H_2 apresenta mesmo valores inferiores aos da electrólise com electricidade proveniente dos painéis fotovoltaicos para produção de H_2 . Contudo, mesmo com a tecnologia CCS, os valores são 1,8 vezes superiores aos apresentados na produção de G.H_2 ou 1,4 vezes no caso de L.H_2 por electrólise com electricidade proveniente da energia eólica

Verifica-se que na produção de G.H_2 por reformação a vapor do GN em estações de reabastecimento ocorre menos emissões de GEE do que em plantas centralizadas, e no caso de produção de L.H_2 ocorre precisamente o contrário. Esta situação é justificável pois apesar do processo de produção de G.H_2 em estações possuir uma eficiência inferior ao das plantas centralizadas, nas estações não há o processo de transporte de H_2 , que como visto anteriormente, representa um consumo energético significativo. Logo nas estações de reabastecimento a análise WTP do G.H_2 por reformação a vapor do GN apresenta menores emissões de GEE que o mesmo processo em plantas centralizadas. Na produção de L.H_2 , o transporte deste, ocupa uma parcela pouco significativa a nível

de consumo energético. Logo como o processo de produção e de liquefacção de L.H₂ em estações possuem uma eficiência inferior ao das plantas centralizadas, a análise WTP do L.H₂ por reformação do GN em estações de reabastecimento apresenta mais emissões de GEE que em plantas centralizadas.

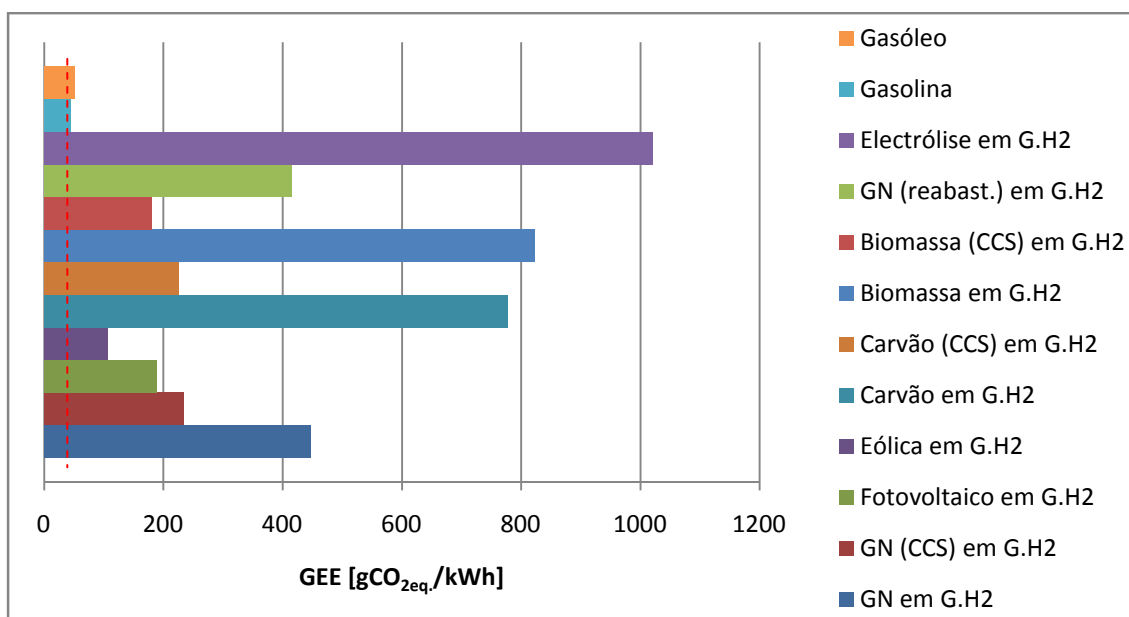


Figura 70 – Comparação da emissão de GEE numa análise WTP (com G.H₂).

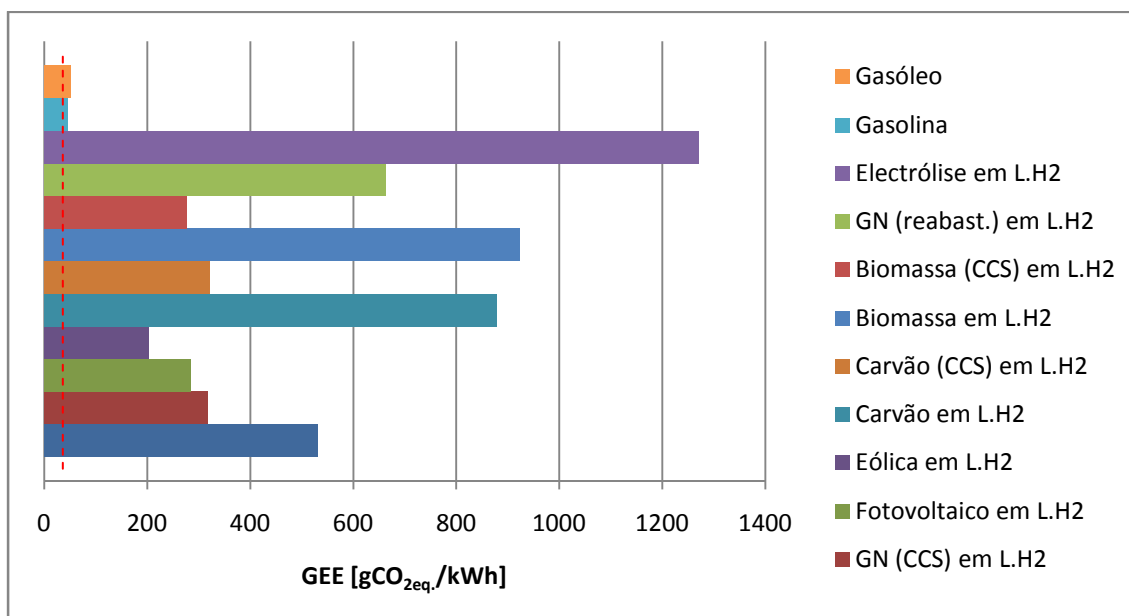


Figura 71 – Comparação da emissão de GEE numa análise WTP (com L.H₂).

De seguida será efectuada um breve resumo da análise WTP do H₂ comparativamente com a gasolina. O quadro seguinte demonstra de forma breve e simples a análise efectuada. O quadro apresenta uma codificação com estrelas, que significam:

- *** – Melhor de todos
- ** – Melhor que a gasolina
- * – Pior que a gasolina, mas melhor de todos os H₂

- 0 – Pior que a gasolina, mas entre o melhor e o pior dos H₂
- ☹ – Pior processo de produção de H₂ (mas melhor que a gasolina)
- ☹☹ – Pior de todos (inclusive que a gasolina)

Quadro 61 – Resumo da análise WTP do H₂ relativamente à gasolina.

	GN	GN (CCS)	GN (reab.)	PV	Eólica	Carvão	Carvão (CCS)	Biomassa	Biomassa (CCS)	Electrólise
Consumo energético	0	0	0	0	*	0	0	0	0	☹☹
VOC	**	**	**	***	**	0	0	**	**	☹☹
CO	0	0	0	☹	0	0	0	*	*	0
NOx	0	0	0	0	*	0	0	0	0	☹☹
PM	0	0	0	0	*	☹☹	☹☹	0	0	0
GEE	0	0	0	0	*	0	0	0	0	☹☹

Por análise do Quadro 61 verifica-se que em geral a produção e distribuição do H₂ até à estação de reabastecimento apresenta piores resultados em termos de consumo energético e emissões que o combustível em comparação, a gasolina. Ainda assim verifica-se que de um modo geral a electrólise de electricidade proveniente da energia eólica apresenta melhores resultados na produção de H₂. Em contra partida a electrólise da electricidade do sistema electroprodutor nacional é a que apresenta piores resultados em termos de consumos energéticos e emissões de poluentes.

Após a análise do H₂ enquanto combustível disponível na estação de reabastecimento, efectuar-se-á uma análise aplicando o H₂ ao sector dos transportes, ou seja, será efectuada uma análise WTW. Nesta análise serão comparados os resultados dos dez cenários referidos acima com os de um veículo ICE a gasolina.

• Análise WTW

Nesta análise será acrescentado à análise WTP a fase de utilização do combustível no sector dos transportes, ou seja, a fase PTW. Deste modo para além das considerações tomadas para a análise WTP, considerou-se que o combustível é utilizado num veículo ligeiro de passageiros no referido percurso do Oceanário (Lisboa) à Casa da Música (Porto). O veículo ligeiro de passageiros de norma EURO IV, possui uma cilindrada entre 1,4l e os 2,0 l. A velocidade média, como referido anteriormente, é igual para todos os cenários (108 km/h). Serão analisadas os consumos energéticos e emissões WTW, de um veículo ICE a gasolina comparativamente com os veículos a H₂. Utilizar-se-á dois veículos diferentes a H₂ de forma a verificar a variação de consumo energético e emissões dentro dos próprios veículos a H₂, ou seja, o veículo a gasolina será comparado com um veículo ICE a H₂ e um FCV a H₂. De salientar que os dois veículos a H₂ serão analisados para G.H₂ e L.H₂.

Inicialmente será abordada a análise e termos de consumos energéticos e posteriormente em termos de emissões de poluentes locais e de GEE. Da Figura 72 à 75 encontram-se os consumos energéticos totais WTW dos veículos considerados. A linha vermelha representa o veículo de cenário base, ou seja, o veículo ICE a gasolina.

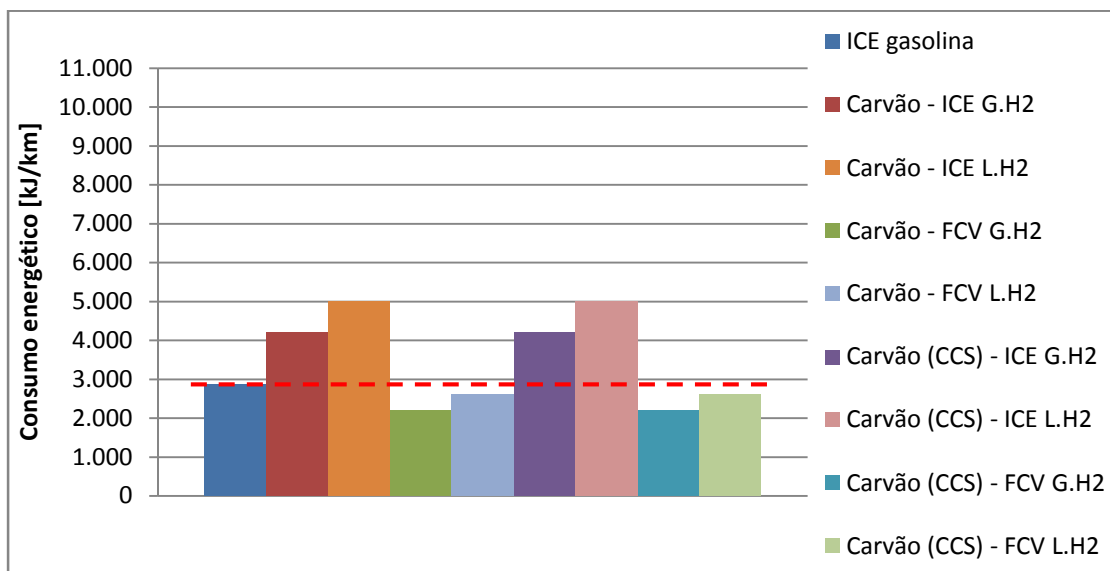


Figura 72 – Consumos energéticos WTW, com o H₂ produzido do carvão.

Verifica-se que no caso do H₂ produzido por gaseificação do carvão, apenas os veículos a célula de combustível apresentam menor consumo energético que o veículo de cenário base (Figura 72). Este facto é verídico quer para FCV a G.H₂, quer para FCV a L.H₂.

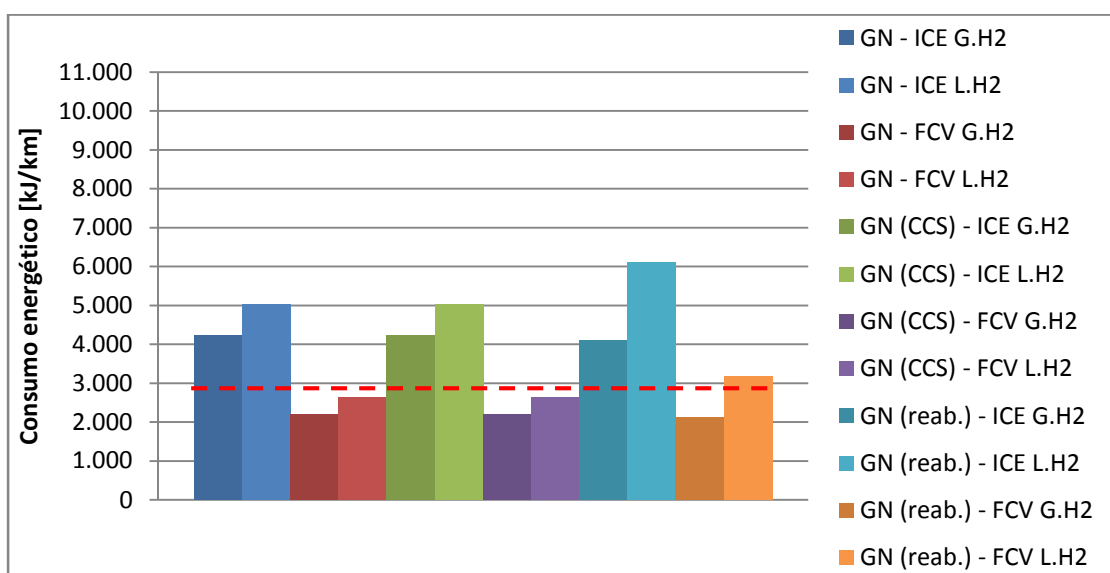


Figura 73 – Consumos energéticos WTW, com o H₂ produzido do GN.

A Figura 73 apresenta consumo energético, com veículos a H₂ produzido por reformação a vapor do GN. Verifica-se que tal como no H₂ produzido pela gaseificação do carvão, os veículos a ICE a H₂ apresentam maior consumo energético que o veículo base a gasolina. Contudo, neste caso, o veículo FCV a L.H₂ produzido por reformação a

vapor do GN em estações de reabastecimento também apresenta um consumo energético superior ao veículo ICE a gasolina.

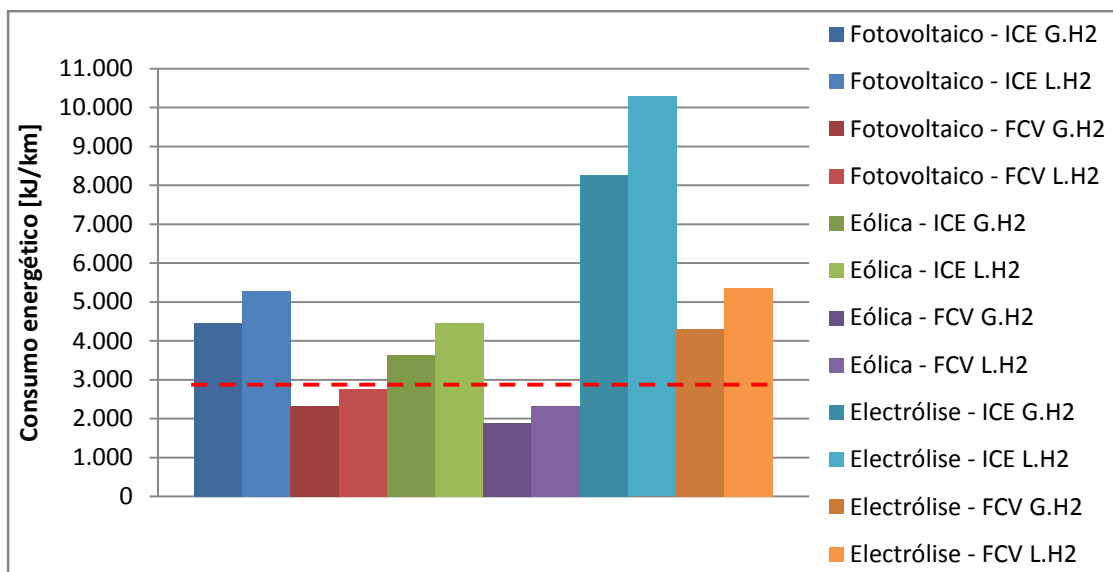


Figura 74 – Consumos energéticos WTW, com o H₂ produzido por electrólise.

A Figura 74 apresenta o consumo energético WTW com os veículos a H₂ produzido por electrólise. É apresentado o H₂ líquido e gasoso produzido por electrólise com electricidade de três origens distintas, ou seja, electricidade do sistema electroprodutor nacional (apresentada na Figura 74 como electrólise), electricidade proveniente da energia eólica (apresentada na Figura 74 como eólica) e electricidade proveniente dos painéis fotovoltaicos (apresentada na Figura 74 como fotovoltaico). Verifica-se que os veículos com ICE a H₂ produzido por electrólise apresentam numa análise WTW maior consumo energético por quilómetro que o veículo com ICE a gasolina. No caso do H₂ produzido por electrólise da electricidade do sistema electroprodutor nacional o consumo energético por quilómetro é elevado, apresentando mesmo os FCV a H₂ consumos de energia total superiores aos do veículo base. Os veículos com ICE a H₂ produzido por electrólise com electricidade do sistema electroprodutor nacional apresentam consumos de energia por quilómetro 2,9 vezes superiores ao do veículo com ICE a gasolina, no caso de G.H₂ e 3,6 vezes no caso de L.H₂.

De facto os veículos com ICE a H₂ produzido por electrólise com electricidade proveniente da energia eólica ou dos painéis fotovoltaicos apresentam um consumo energético superior ao do veículo a gasolina. No entanto a produção de electricidade por estas fontes é renovável. Deste modo, no H₂ por recurso à energia eólica, do consumo de energia apresentado na Figura 74, apenas 18% no caso do G.H₂ e 29% no caso do L.H₂, correspondem a energia fóssil. No H₂ obtido por electrólise da electricidade proveniente dos painéis fotovoltaicos, do consumo energético apresentado na Figura 74, apenas 27% no caso do G.H₂ e 35% no caso do L.H₂, correspondem a energia fóssil. Sendo assim, verifica-se que para os veículos a H₂ analisados, com o H₂ produzido por electrólise da electricidade proveniente da energia eólica ou dos painéis fotovoltaicos, o consumo de energia fóssil é sempre inferior ao apresentado pelo veículo a gasolina. No oposto surgem os veículos analisados com H₂ produzido por electrólise da electricidade

referente ao sistema electroprodutor nacional, que independentemente do tipo de veículo a H₂, o consumo de energia por quilómetro é sempre superior ao veículo a gasolina.

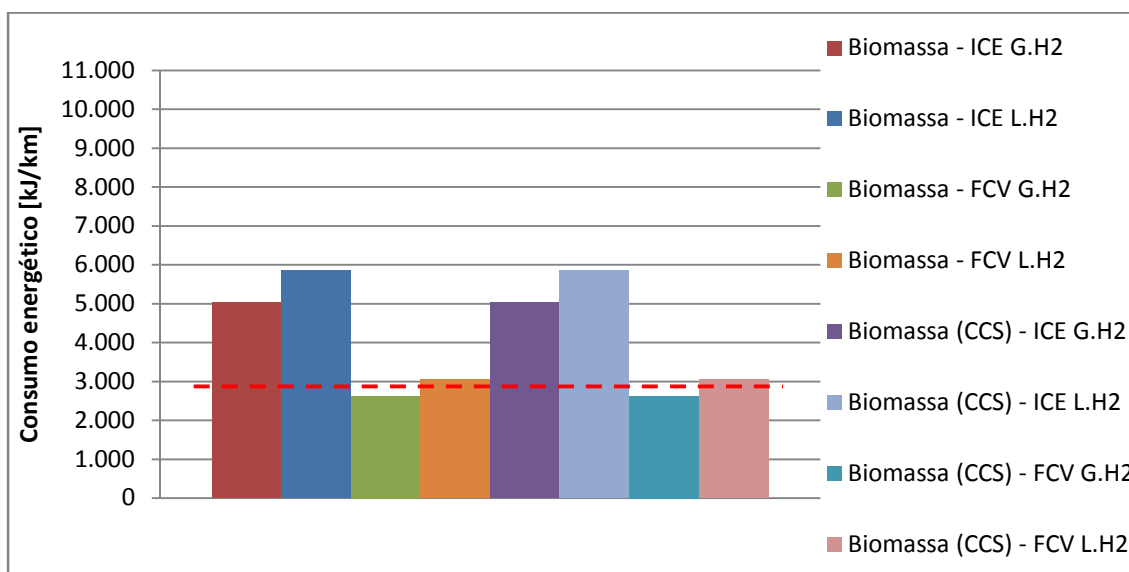


Figura 75 – Consumos energéticos WTW, com o H₂ produzido da biomassa.

Dos veículos com H₂ produzido por gaseificação da biomassa, apenas os FCV com G.H₂ apresentam menor consumo de energia que o veículo com ICE a gasolina. Mesmo analisando em termos de consumo de energia fóssil por quilómetro, apenas os FCV com H₂ produzido por gaseificação da biomassa apresentam menores consumos que o veículo base. Do valor apresentado como consumo energético na Figura 75, 60% no caso de G.H₂ e 62% no caso de L.H₂, corresponde a energia fóssil.

Verifica-se que os veículos com L.H₂ apresentam um consumo de energia por quilómetro superior aos com G.H₂. Constata-se também que os veículos com ICE a H₂ apresentam um consumo energético por quilómetro superior aos FCV a H₂, sendo também superior ao veículo com ICE a gasolina, independentemente da forma de produção de H₂ (das analisadas). Contudo analisando em termos de consumo de energia fóssil por quilómetro, os veículos com ICE a H₂ produzido por electrólise com electricidade proveniente dos painéis fotovoltaicos ou da energia eólica, apresentam valores inferiores ao veículo base.

De seguida foi efectuada, para os mesmos veículos, uma análise WTW em termos de emissão de poluentes locais (VOC, CO, NO_x e PM). Na Figura 76 são apresentadas as emissões de VOC numa análise WTW para o veículo base e para os referidos veículos a H₂, sendo este produzido por gaseificação do carvão. Por análise da figura seguinte verifica-se que o H₂ produzido por gaseificação do carvão e utilizado nos veículos mencionados (ICE e FCV), apresenta menos emissões de VOC por quilómetro que o veículo convencional de motor a gasolina.

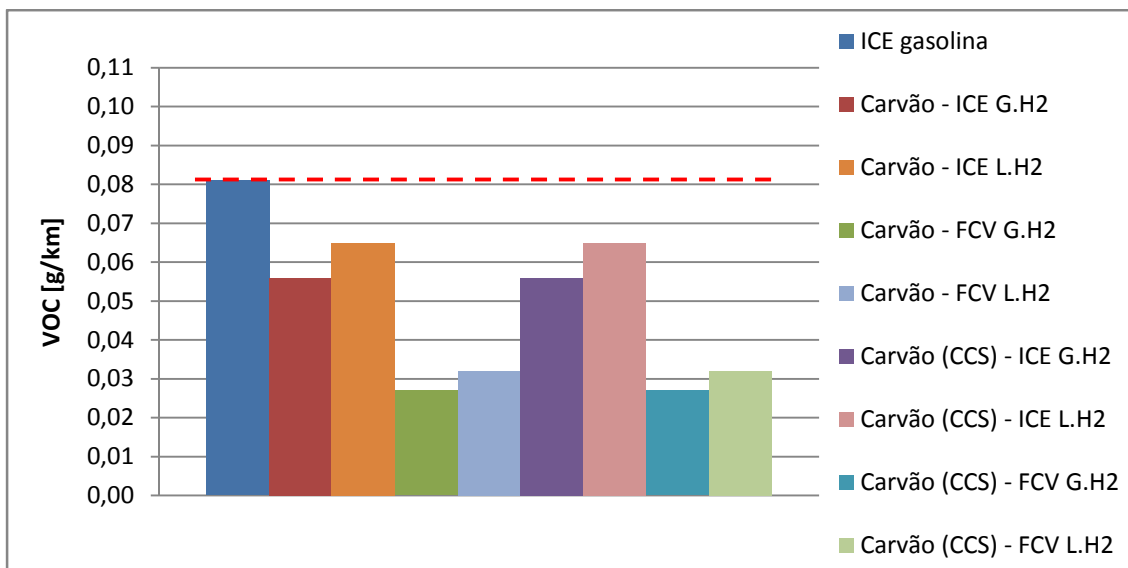


Figura 76 – Emissão de VOC WTW, com o H₂ produzido do carvão.

No caso de o H₂ produzido por reformação a vapor do GN, verifica-se a mesma situação, ou seja, os veículos a H₂ apresentam menos emissões de VOC por quilómetro que o veículo base, demarcado na Figura 77 pela linha a tracejado vermelho. Constata-se que os veículos com H₂ produzido por reformação do GN apresentam menos emissões de VOC por quilómetro que no caso do H₂ produzido por gaseificação do carvão. Dos veículos analisados, com H₂ produzido por GN, o que apresenta mais emissões de VOC é o com ICE a L.H₂ produzido em estações de reabastecimento. No entanto os valores são 45% inferiores aos do veículo com ICE a gasolina.

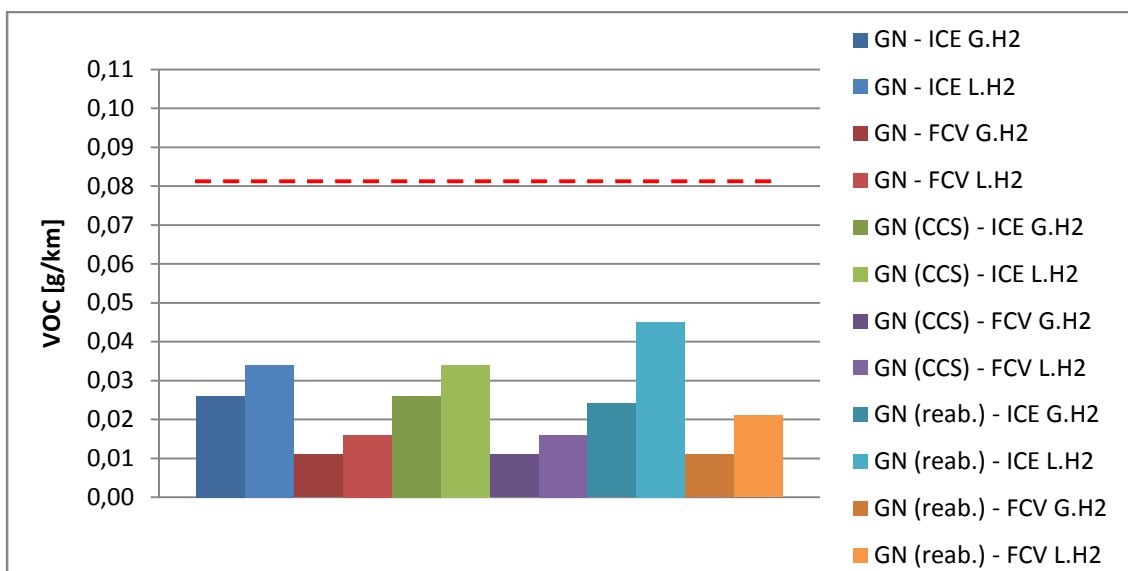


Figura 77 – Emissão de VOC WTW, com o H₂ produzido do GN.

O H₂ produzido por electrólise e aplicado aos veículos a H₂ referidos, apresenta os melhores e os piores resultados em termos de emissões de VOC por quilómetro, dependendo da fonte de produção de electricidade (Figura 78).

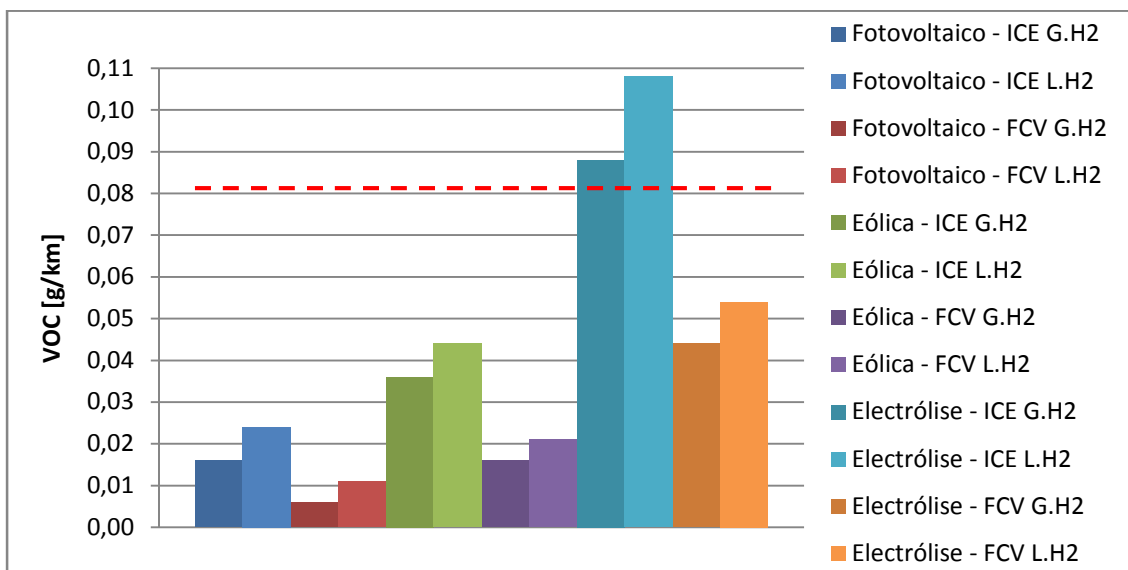


Figura 78 – Emissão de VOC WTW, com o H₂ produzido por electrólise.

A electricidade proveniente dos painéis fotovoltaicos para produção de G.H₂ e posterior utilização em FCV é de todas as formas analisadas a que apresenta menores emissões de VOC por quilómetro. Em contra partida a produção de L.H₂ com electricidade do sistema electroprodutor nacional aplicado em veículos com ICE, é a que apresenta mais emissões de VOC por quilómetro, tendo mesmo mais emissões que o veículo convencional (Figura 78).

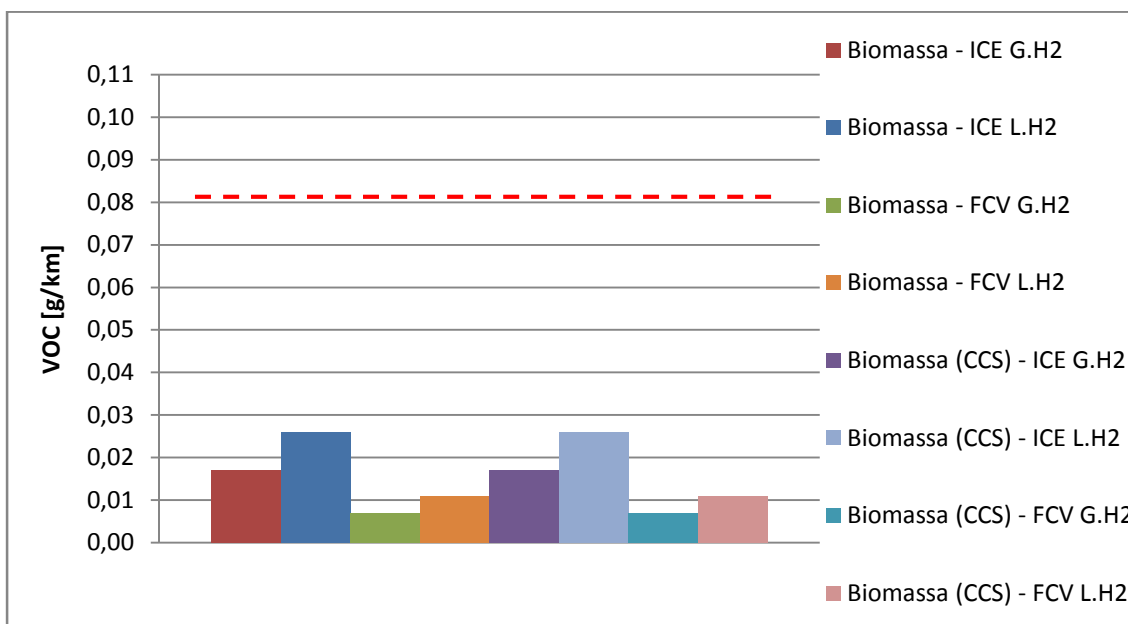


Figura 79 – Emissão de VOC WTW, com o H₂ produzido da biomassa.

A produção de H₂ por gaseificação da biomassa e utilização em veículos apresenta baixos valores de emissão de VOC. Os valores são entre 3,1 e 11,6 vezes inferiores às emissões do veículo convencional, dependendo do tipo de veículo e do estado físico do H₂ utilizado no veículo (Figura 79).

Verifica-se que os veículos a L.H₂ apresentam mais emissões que os com G.H₂. Contudo, à excepção do veículo ICE com H₂ (líquido ou gasoso) produzido por electrólise do sistema electroprodutor nacional, os veículos a H₂ apresentam menos emissões de VOC por quilómetro que o veículo base com ICE a gasolina.

Relativamente às emissões de CO por quilómetro, tal como nas emissões de VOC, de um modo geral os veículos a H₂ apresentam valores inferiores ao veículo base com ICE a gasolina (ver da Figura 80 à 83). No caso do H₂ produzido por gaseificação do carvão, no ciclo de vida WTW, a aplicação do L.H₂ no veículo a ICE é o que apresenta mais emissões de CO. Contudo as emissões apresentadas são 56% inferiores às do veículo com ICE a gasolina (Figura 80). Com H₂ produzido por gaseificação do carvão, o FCV com G.H₂ é o que apresenta menos emissões de CO por quilómetro, sendo os valores 91% inferiores aos do veículo a gasolina.

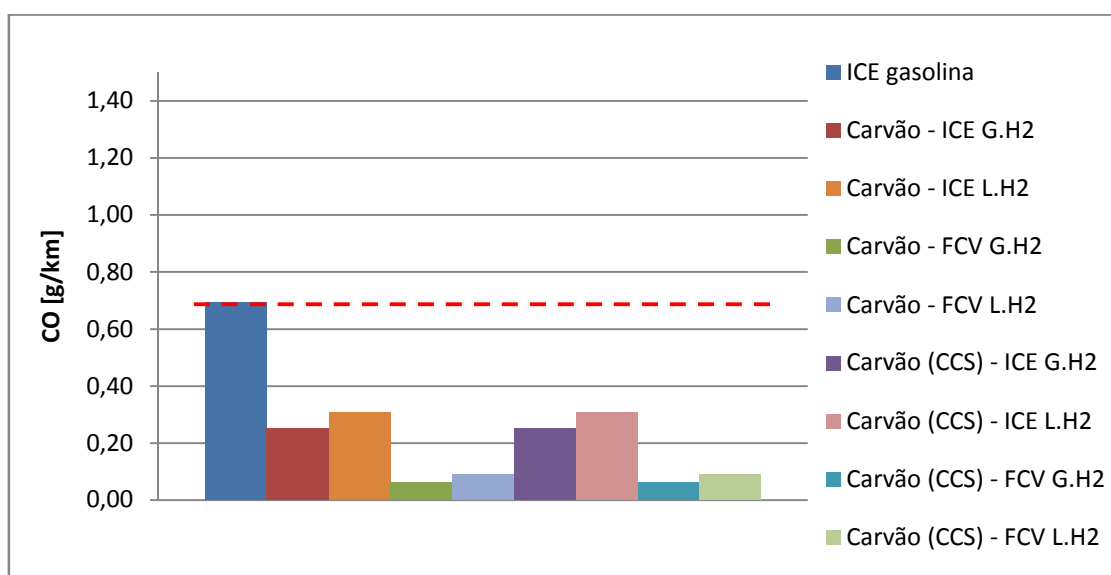


Figura 80 – Emissão de CO WTW, com o H₂ produzido do carvão.

A aplicação do H₂ produzido por reformação a vapor do GN em veículos, apresenta mais emissões de CO por quilómetro quando produzido nas estações de reabastecimento e utilizado na forma líquida em veículos ICE. No entanto os valores são 47% inferiores aos do veículo a gasolina (Figura 81). No caso da produção de G.H₂ por reformação do GN e utilização em FCV, as emissões de CO por quilómetro são 92% inferiores às apresentadas pelo veículo convencional.

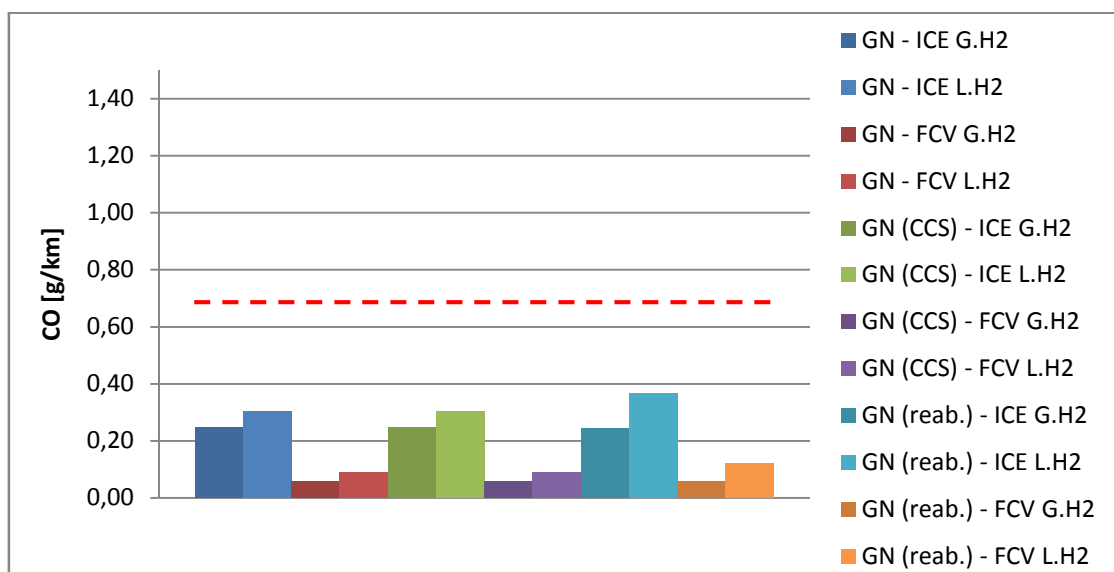


Figura 81 – Emissão de CO WTW, com o H₂ produzido do GN.

A produção de H₂ por electrólise e posterior aplicação em veículos apresenta uma grande variação em termos de emissões de CO por quilómetro (Figura 82). Os valores variam desde 94% inferiores a 110% superiores, aos resultados apresentados pelo veículo com ICE a gasolina, dependendo da fonte de produção de electricidade utilizada na electrólise. O veículo com ICE a H₂ produzido por electrólise com electricidade dos painéis fotovoltaicos apresenta os piores resultados em termos de emissões de CO por quilómetro. Os valores são 100% no caso de G.H₂ e 110% no caso de L.H₂, superiores aos apresentados pelo veículo convencional. Mesmo aplicando o H₂, produzido por recurso aos painéis fotovoltaicos, em FCV, as emissões de CO por quilómetro são muito próximas das do veículo a gasolina. O veículo a ICE com L.H₂ produzido por electrólise com electricidade do sistema electroprodutor nacional também apresenta emissões de CO por quilómetro superiores às do veículo a gasolina (Figura 82).

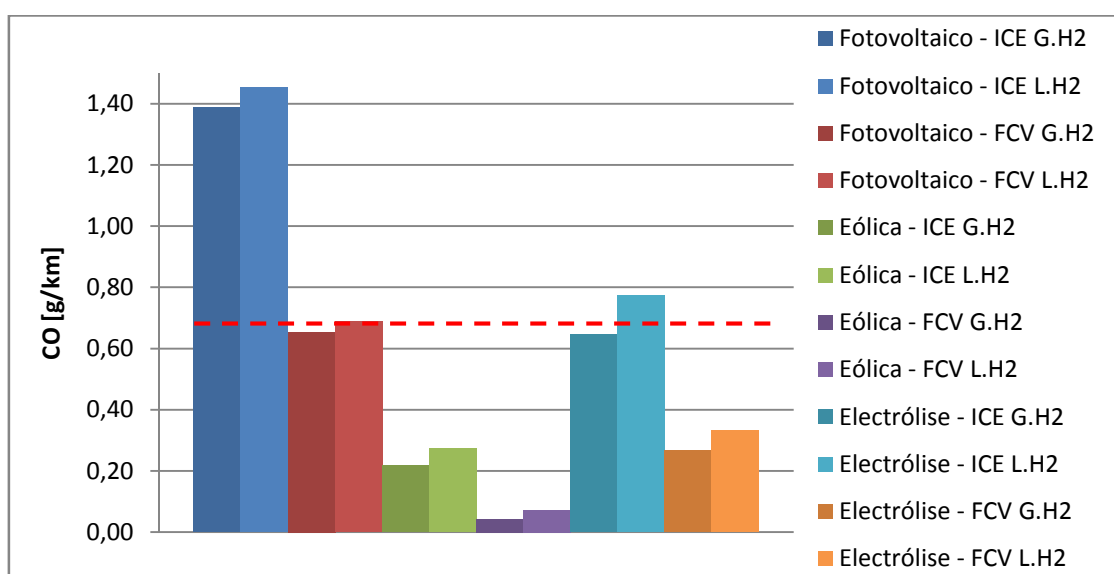


Figura 82 – Emissão de CO WTW, com o H₂ produzido por electrólise.

No entanto é com o G.H₂ produzido por gaseificação da biomassa aplicado em FCV que ocorrem menos emissões de CO por quilómetro (Figura 83). Os valores são próximos dos apresentados pelo FCV a G.H₂ produzido por electrólise com electricidade proveniente da energia eólica e 96% inferiores aos do veículo com ICE a gasolina. É no veículo com ICE a L.H₂ produzido por gaseificação da biomassa que ocorrem mais emissões de CO por quilómetro percorrido, ainda assim os valores são 65% inferiores aos do veículo com ICE a gasolina.

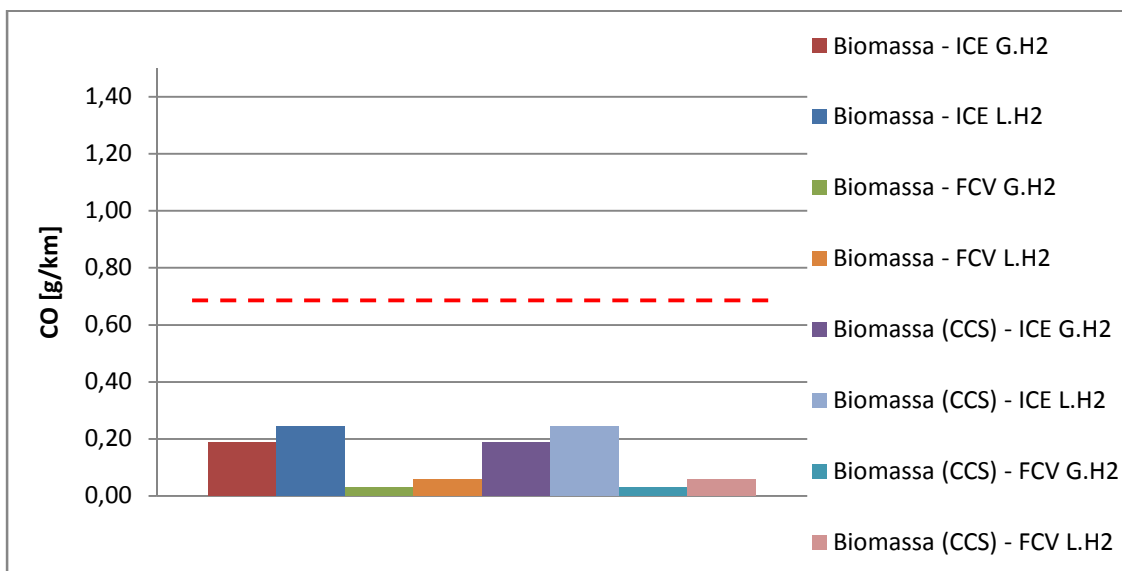


Figura 83 – Emissão de CO WTW, com o H₂ produzido da biomassa.

Constata-se que os veículos com L.H₂ apresentam mais emissões de CO por quilómetro percorrido, que os veículos com G.H₂. No entanto verifica-se que apenas os veículos com ICE a H₂ (líquido e gasoso) produzido por electrólise com electricidade dos painéis fotovoltaicos e os veículos com ICE a L.H₂ produzido por electrólise com electricidade do sistema electroprodutor nacional, apresentam emissões de CO por quilómetro superiores às veículo convencional. Efectuando uma análise englobando a produção dos painéis fotovoltaicos, constata-se que o H₂ aplicado em veículos, é o que apresenta mais emissão de CO por quilómetro. Este é um facto a salientar, uma vez que painéis fotovoltaicos são muitas vezes considerados uma fonte limpa de produção de energia. O elevado consumo energético para produção dos painéis proporciona estes resultados.

Numa análise WTW em termos de emissões de NO_x por quilómetro, verifica-se que em geral o H₂ utilizado em veículos apresenta piores resultados relativamente à gasolina aplicada em veículos com ICE (ver da Figura 84 à 87). No caso do H₂ produzido por gaseificação do carvão, verifica-se que os valores de emissão de NO_x por quilómetro são sempre superiores aos do veículo convencional, como se pode observar na Figura 84. Do H₂ produzido por gaseificação do carvão, o FCV com G.H₂ é o que apresenta melhores resultados, apesar de serem 3,1 vezes superiores às emissões dadas para o veículo a gasolina. O veículo com ICE a L.H₂, que é o que possui piores resultados com H₂ produzido por gaseificação do carvão, emite por quilómetro 6,9 vezes mais NO_x que o veículo convencional.

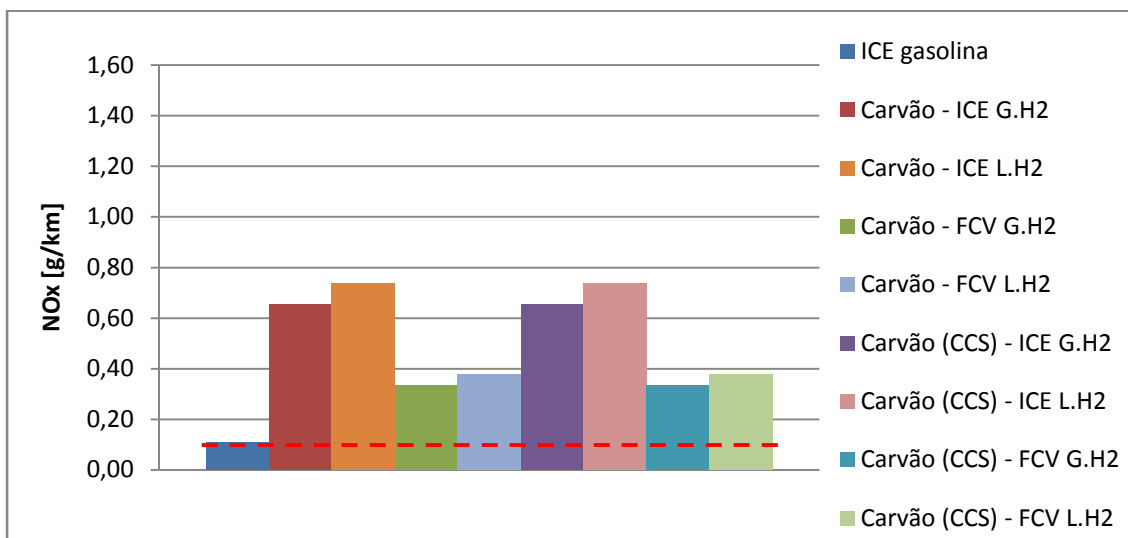


Figura 84 – Emissão de NO_x WTW, com o H₂ produzido do carvão.

Verifica-se que de um modo geral, com H₂ produzido por reformação a vapor do GN, as emissões de NO_x por quilómetro são inferiores às do H₂ produzido por gaseificação do carvão e aplicado em veículos (Figura 85). Contudo em qualquer dos veículos a H₂ por reformação de GN analisados as emissões de NO_x por quilómetro são superiores às do veículo convencional a gasolina. Do H₂ produzido por reformação a vapor do GN, o que é produzido nas estações de reabastecimento e utilizado na forma gasosa em FCV apresenta melhores resultados em termos de emissões de NO_x por quilómetro, apesar de serem superiores aos da gasolina em 36%. Em contra partida o veículo com ICE a L.H₂ produzido em estações de reabastecimento possui mais emissões de NO_x por quilómetro, sendo estas 5,6 vezes superiores às do veículo com ICE a gasolina.

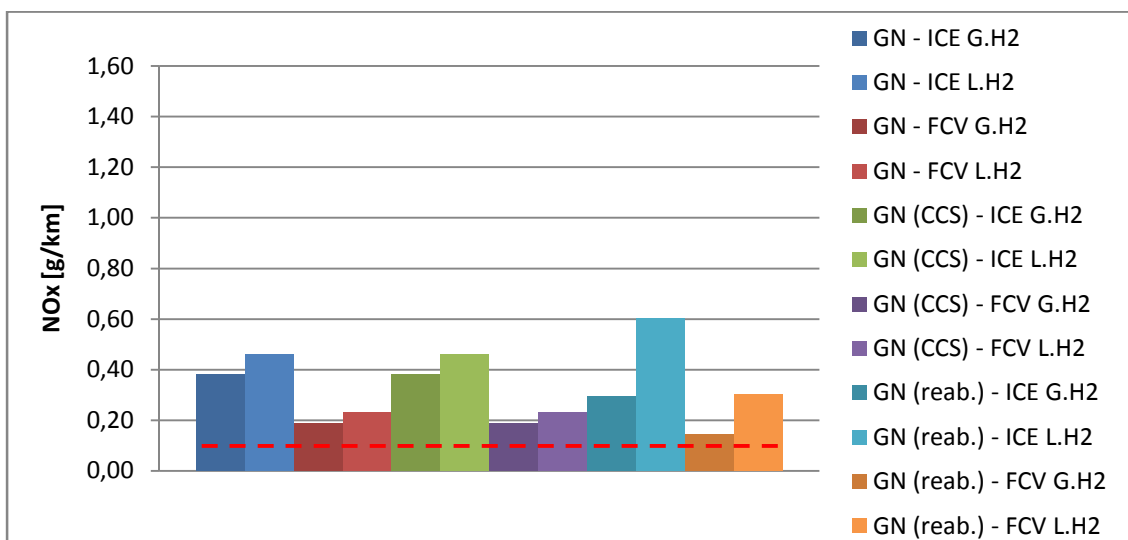


Figura 85 – Emissão de NO_x WTW, com o H₂ produzido do GN.

À semelhança da análise WTW às emissões de VOC, nas emissões de NO_x a electrólise apresenta os melhores e os piores resultados, dependendo da fonte de energia para produção da electricidade utilizada na electrólise. O H₂ produzido por electrólise com electricidade proveniente da energia eólica e posteriormente utilizado em FCV na forma

gasosa, apresenta os melhores resultados, sendo mesmo o único que apresenta menos emissões de NO_x por quilómetro que o veículo convencional (Figura 86). O veículo com ICE a gasolina apresenta mais 15% de emissões de NO_x por quilómetro que o referido FCV a G.H₂.

No entanto o H₂ obtido por electrólise com electricidade do sistema electroprodutor nacional aplicado em veículos, demonstra valores de emissão de NO_x por quilómetro muito elevados. Esse H₂ na forma líquida utilizado em veículos ICE possui emissões de NO_x por quilómetro percorrido 14,8 vezes superiores às do veículo convencional.

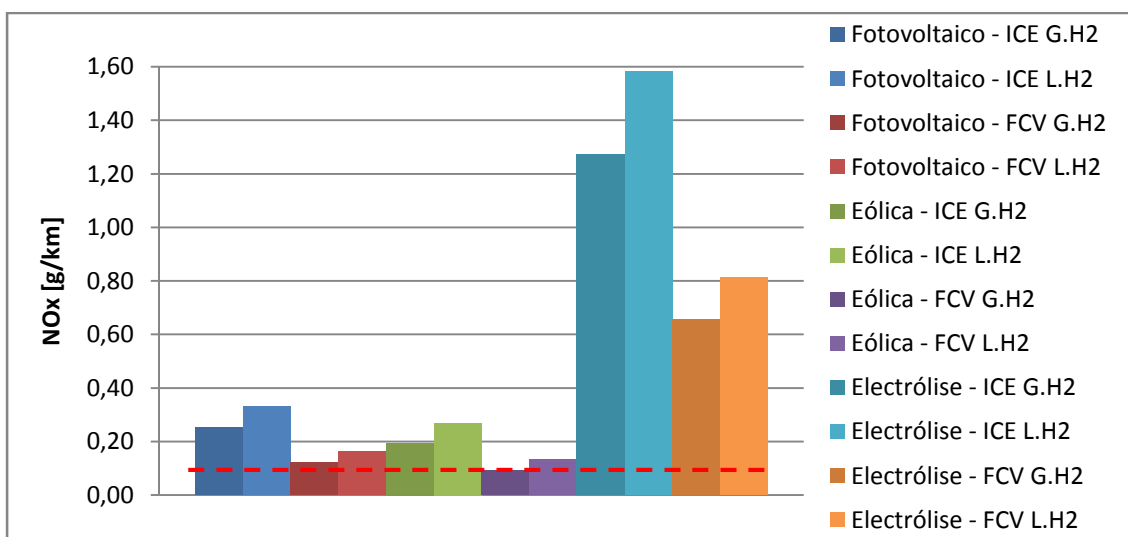


Figura 86 – Emissão de NO_x WTW, com o H₂ produzido por electrólise.

O H₂ produzido por gaseificação da biomassa e utilizado em veículos, apresenta menores emissões de NO_x por quilómetro que o H₂ produzido por gaseificação da carvão ou na reformação a vapor do GN e posteriormente utilizado em veículos, como se pode observar nas Figuras 84, 85 e 87. Contudo nenhum dos veículos analisados com H₂ por gaseificação da biomassa apresenta menos emissões que o veículo convencional a gasolina.

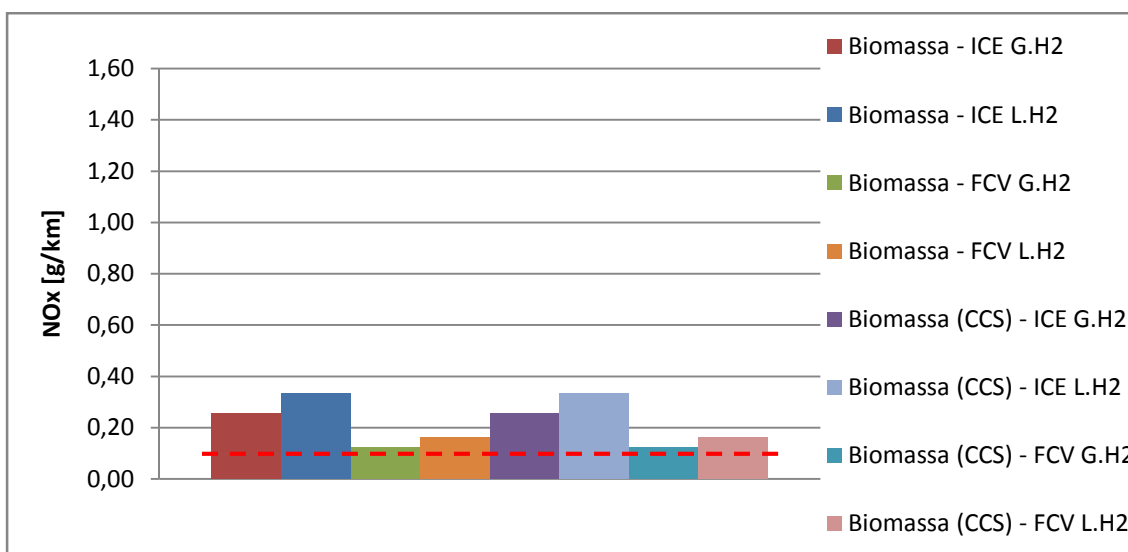


Figura 87 – Emissão de NO_x WTW, com o H₂ produzido da biomassa.

Verifica-se que apenas o FCV com G.H₂ produzido por electrólise com electricidade proveniente da energia eólica possui menos emissões de NO_x por quilómetro que o veículo convencional. O H₂ produzido por electrólise da electricidade do sistema electroprodutor nacional e aplicado em veículos é o que apresenta piores emissões de NO_x por quilómetro. Consta-se de novo, que como seria de esperar os veículos com L.H₂ possuem mais emissões de NO_x por quilómetro que os com G.H₂.

Na análise WTW efectuada em termos de emissões de PM por quilómetro, constatou-se que os veículos com qualquer uma das formas de produção de H₂ em estudo, apresentam piores resultados que o veículo convencional com gasolina. Este facto pode ser observado nos dados apresentados da Figura 88 à 91.

Os veículos com H₂ produzido por gaseificação do carvão apresentam elevados valores de emissão de PM por quilómetro (Figura 88). O FCV a G.H₂ é o que apresenta menores emissões de PM por quilómetro, apesar de serem 10,8 vezes superiores às emissões do veículo a gasolina. Do H₂ obtido por gaseificação do carvão, o que é utilizado na forma líquida num veículo com ICE, é o que apresenta piores emissões de PM por quilómetro, sendo 22,3 vezes superiores às do veículo convencional.

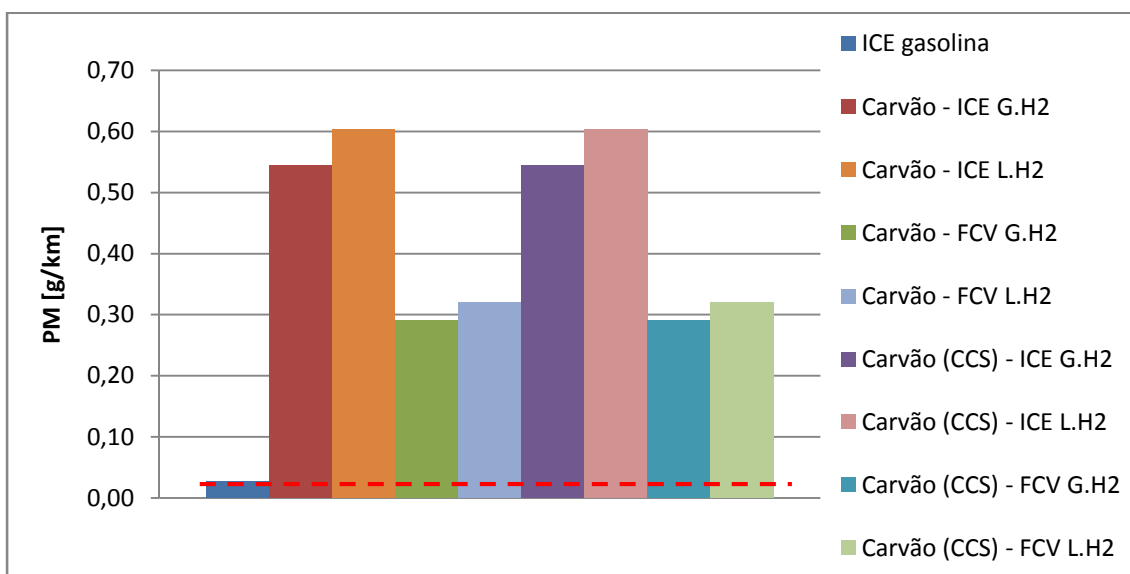


Figura 88 – Emissão de PM WTW, com o H₂ produzido do carvão.

O H₂ reformado a vapor do GN e utilizado em veículos apresenta menores emissões de PM por quilómetro numa análise WTW, que o H₂ gaseificado do carvão e posteriormente utilizado em veículos (Figura 88 e 89). Contudo nenhum dos veículos analisados com H₂ reformado do GN possui menores emissões de PM por quilómetro que o veículo convencional a gasolina. O G.H₂ produzido em estações de reabastecimento por reformação a vapor do GN e aplicado em veículos possui menores emissões de PM por quilómetro percorrido que o G.H₂ produzido do mesmo modo em plantas centralizadas e aplicado também em veículos. No L.H₂ acontece precisamente o

oposto, ou seja, quando produzido em plantas centralizadas e aplicado em veículos as emissões de PM por quilómetro são menores.

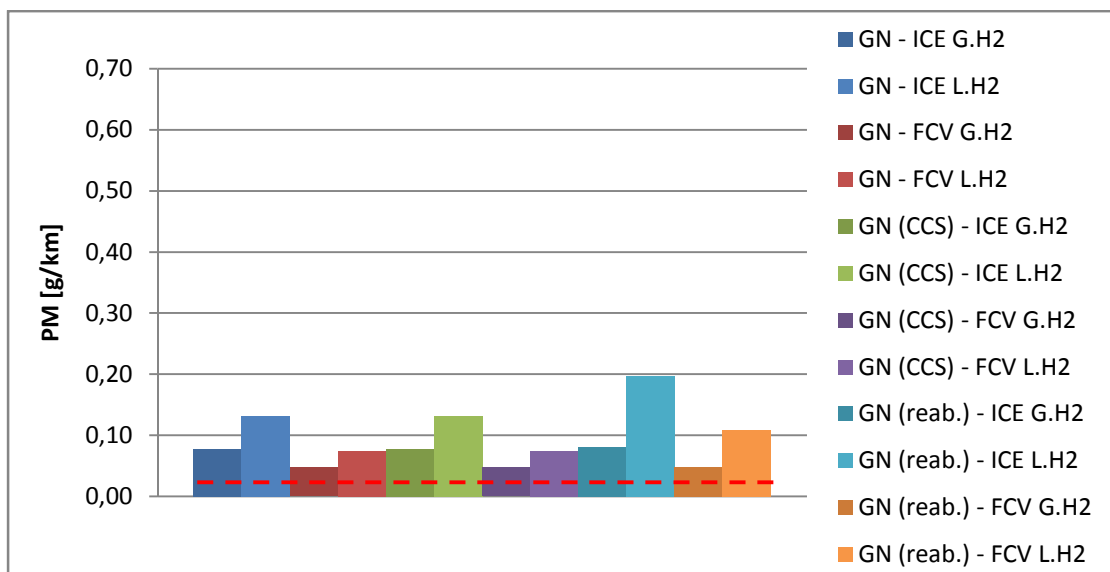


Figura 89 – Emissão de PM WTW, com o H₂ produzido do GN.

Tal como no VOC e no NO_x, na análise WTW das emissões de PM por quilómetro, o H₂ produzido por electrólise e utilizado em veículos apresenta os melhores e os piores resultados dependendo da fonte de energia para produção da electricidade. O H₂ obtido por electrólise da electricidade proveniente da energia eólica utilizado na forma gasosa em FCV, é o que possui menores emissões de PM por quilómetro. No entanto estas são superiores às do veículo convencional a gasolina em 14,8%. Com pior valor de emissão de PM por quilómetro percorrido surge o veículo com ICE a L.H₂ produzido por electrólise com electricidade do sistema electroprodutor nacional, sendo este valor 22,6 vezes superior ao do veículo com ICE a gasolina.

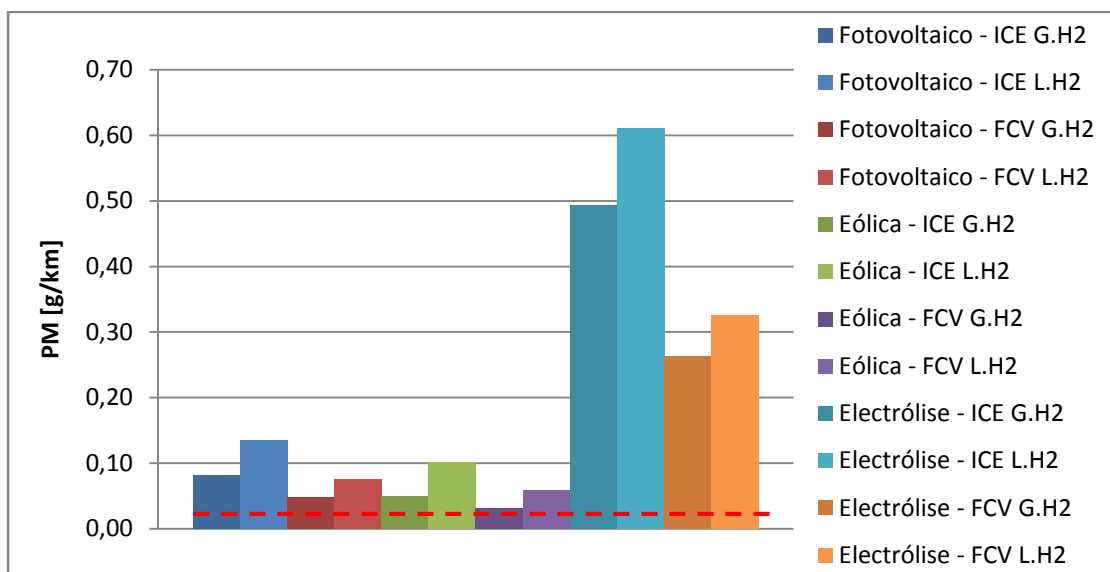


Figura 90 – Emissão de PM WTW, com o H₂ produzido por electrólise.

O H_2 produzido por gaseificação da biomassa e aplicado em veículos possui menos emissões de PM por quilómetro percorrido que o H_2 produzido por gaseificação do carvão ou por reformação a vapor do GN (ver Figuras 88, 89 e 91). Qualquer um dos veículos a H_2 proveniente da biomassa apresenta valores de emissão de PM superiores ao veículo convencional, como se pode observar na Figura 91. Do H_2 produzido por gaseificação da biomassa, a sua utilização na forma gasosa em FCV, é a que possui menos emissões de PM por quilómetro percorrido, contudo estas são superiores às do ICE a gasolina em 22%. Em contrapartida a forma líquida do H_2 aplicada em veículos com ICE possui 3,9 vezes mais emissões de PM que o veículo convencional, sendo o pior em termos de emissões de PM com H_2 produzido por gaseificação da biomassa.

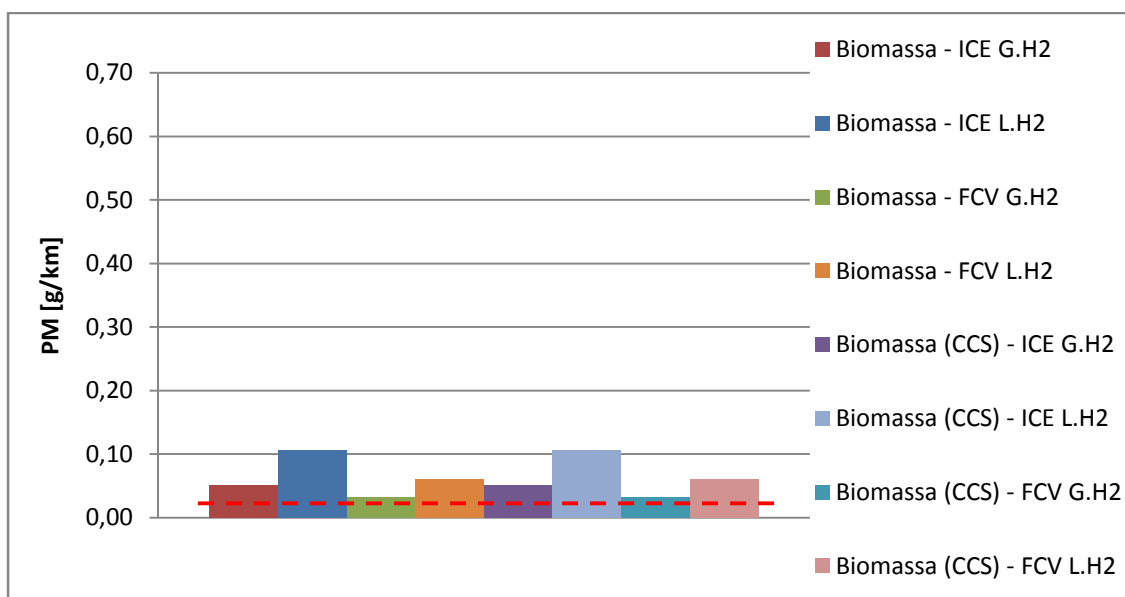


Figura 91 – Emissão de PM WTW, com o H_2 produzido da biomassa.

Verifica-se de novo que o L. H_2 aplicado em veículos possui mais emissões que o G. H_2 . Relativamente à emissão de partículas por quilómetro percorrido, o FCV a G. H_2 obtido por recurso a energia eólica (com electrólise) apresenta os melhores resultados e o ICE com L. H_2 produzido por electrólise da electricidade do sistema electroprodutor nacional os piores. Contudo nenhum dos veículos a H_2 analisados apresenta menores emissões de PM que o veículo convencional a gasolina.

De seguida será efectuada a análise WTW em termos de poluentes globais. No caso serão analisados os GEE por serem mais abrangentes, ou seja, englobam o CO_2 , o CH_4 e o N_2O .

No H_2 produzido por gaseificação do carvão, apenas quando é utilizada a tecnologia CCS, as emissões de GEE por quilómetro percorrido, são inferiores às do veículo convencional a gasolina (Figura 92). O H_2 produzido por gaseificação do carvão com CCS utilizado em FCV na forma gasosa permite uma poupança de 68,6% das emissões de GEE por quilómetro relativamente ao veículo base com ICE a gasolina. No entanto o H_2 aplicado ao mesmo veículo e produzido da mesma forma mas sem a tecnologia CCS

possui emissões de GEE por quilómetro 9% superiores às do veículo convencional a gasolina.

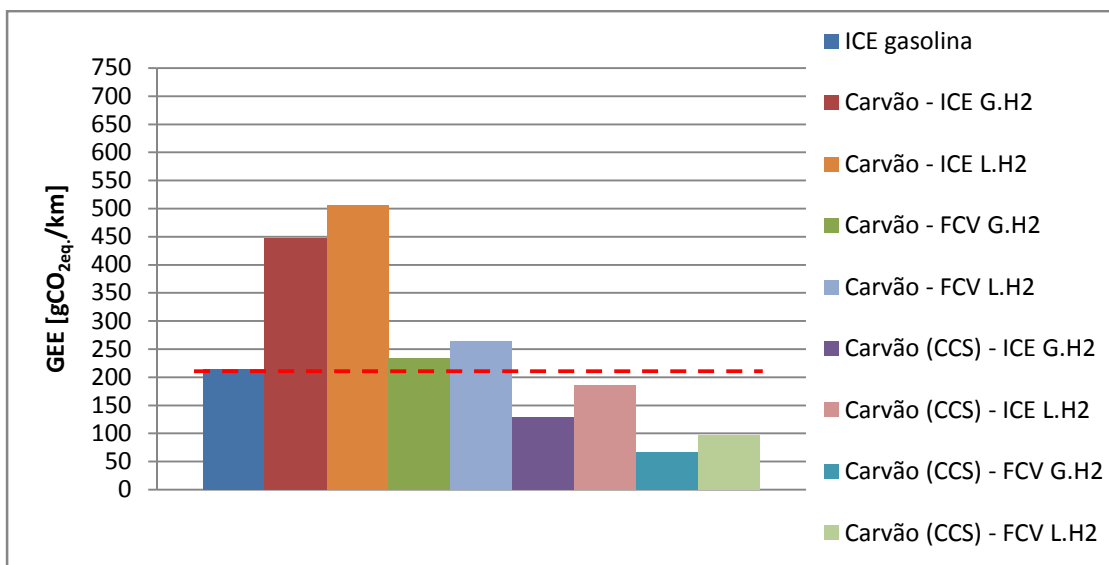


Figura 92 – Emissão de GEE WTW, com o H₂ produzido do carvão.

No geral as emissões de GEE por quilómetro, com o H₂ produzido por reformação a vapor e utilizado em veículos são inferiores às do H₂ produzido por gaseificação do carvão (ver Figuras 92 e 93). Neste caso apenas os veículos com ICE a H₂ por reformação a vapor sem CCS apresentam emissões de GEE por quilómetro superiores às do veículo a gasolina (Figura 93). A CCS mostra-se de novo uma tecnologia que possibilita a utilização de H₂ em veículos a H₂ (ICE ou FCV) com menores emissões de GEE por quilómetro percorrido que o veículo convencional a gasolina. O G.H₂ obtido por reformação a vapor em plantas centralizadas com CCS e utilizado em FCV possibilita uma redução de emissão de GEE por quilómetro percorrido em 67% relativamente ao veículo com ICE a gasolina.

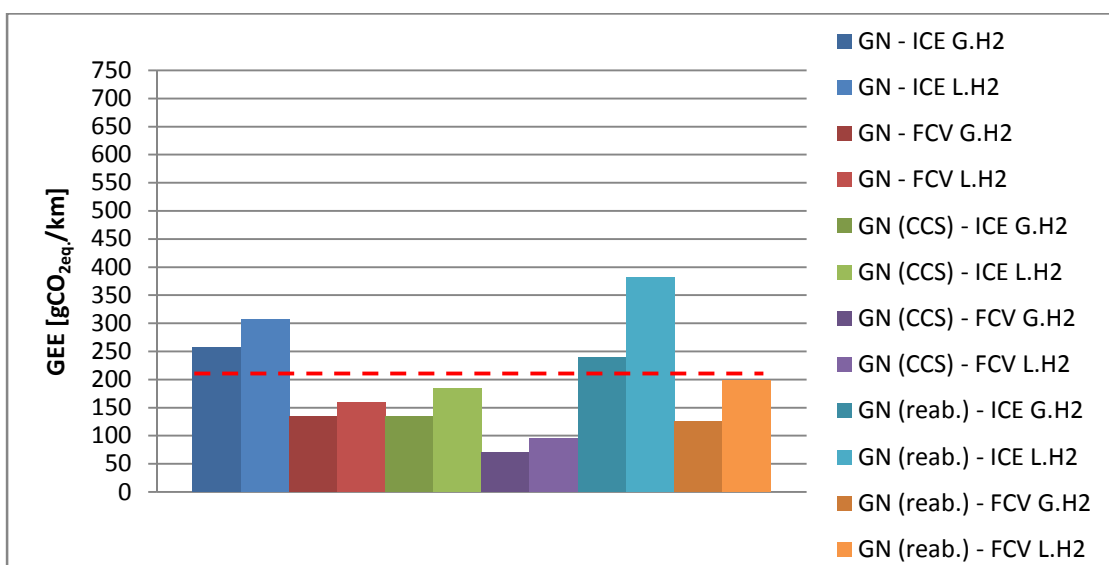


Figura 93 – Emissão de GEE WTW, com o H₂ produzido do GN.

Tal como sucede nos poluentes locais (com excepção do CO), o H₂ produzido por electrólise e utilizado em veículos apresenta os melhores e os piores resultados em termos de emissão de GEE por quilómetro percorrido (Figura 94). A fonte de energia para produção da electricidade essencial para a electrólise revela-se de facto importante, não só em termos de consumo energético como de emissão de poluentes. O H₂ obtido por electrólise com electricidade proveniente da energia eólica e aplicado na forma gasosa em FCV permite uma poupança de 85% de emissões de GEE por quilómetro em relação ao ICE a gasolina. Contudo se no mesmo veículo for utilizado G.H₂ proveniente da electrólise com electricidade do sistema electroprodutor nacional há um acréscimo de emissões de GEE por quilómetro percorrido de 42,6% relativamente às do veículo base a gasolina. A utilização de L.H₂ produzido por electrólise com electricidade do sistema electroprodutor nacional, em veículos com ICE apresenta o pior resultado de todos, sendo o valor da emissão de GEE por quilómetro 3,4 vezes superior à do veículo convencional a gasolina.

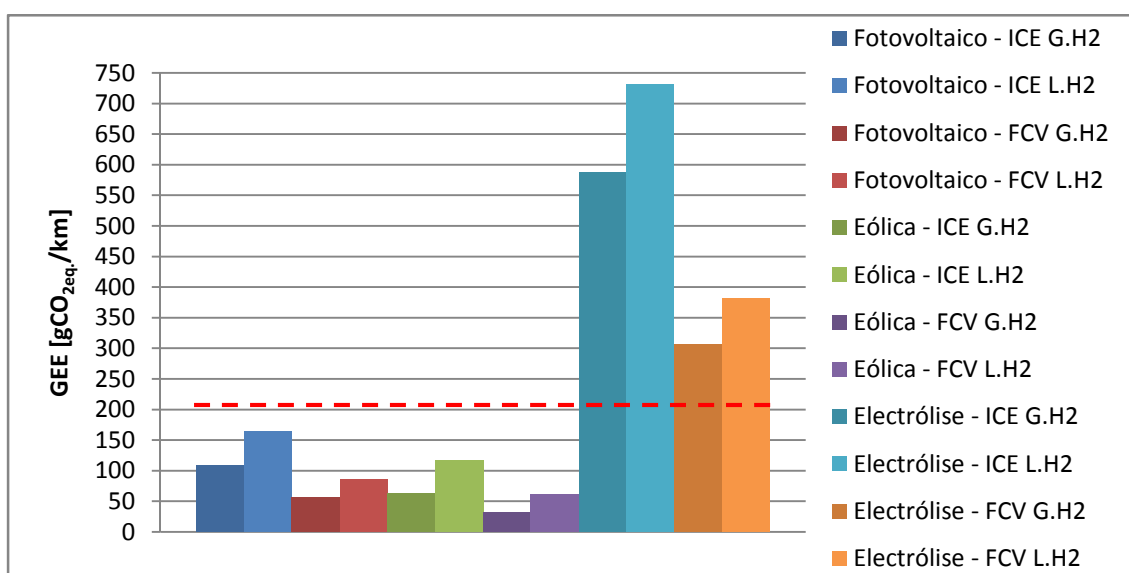


Figura 94 – Emissão de GEE WTW, com o H₂ produzido por electrólise.

O H₂ produzido por gaseificação da biomassa sem CCS e aplicado em veículos apresenta mais emissões de GEE por quilómetro que o H₂ produzido por gaseificação do carvão ou por reformação a vapor do GN (ver Figuras 92, 93 e 95). No entanto, é de salientar que com a utilização da tecnologia CCS, o H₂ por gaseificação da biomassa e utilizado em veículos, apresenta menores emissões de GEE por quilómetro percorrido (ver Figuras 92, 93 e 95). A tecnologia CCS é aplicada sob o processo de produção. Como observado anteriormente (Figuras 52 e 61) o processo de produção de H₂ por gaseificação da biomassa é o que apresenta maior consumo energético relativamente às restantes formas de produção de H₂. Desta forma a redução de emissão de GEE com tecnologia CCS é superior. Do H₂ produzido por gaseificação da biomassa, aquele que é produzido com a tecnologia CCS e utilizado na forma gasosa em FCV apresenta menos emissões de GEE por quilómetro percorrido (Figura 95). Neste caso há uma poupança de emissão de GEE por quilómetro de 75% face aos valores de emissão do veículo base a gasolina.

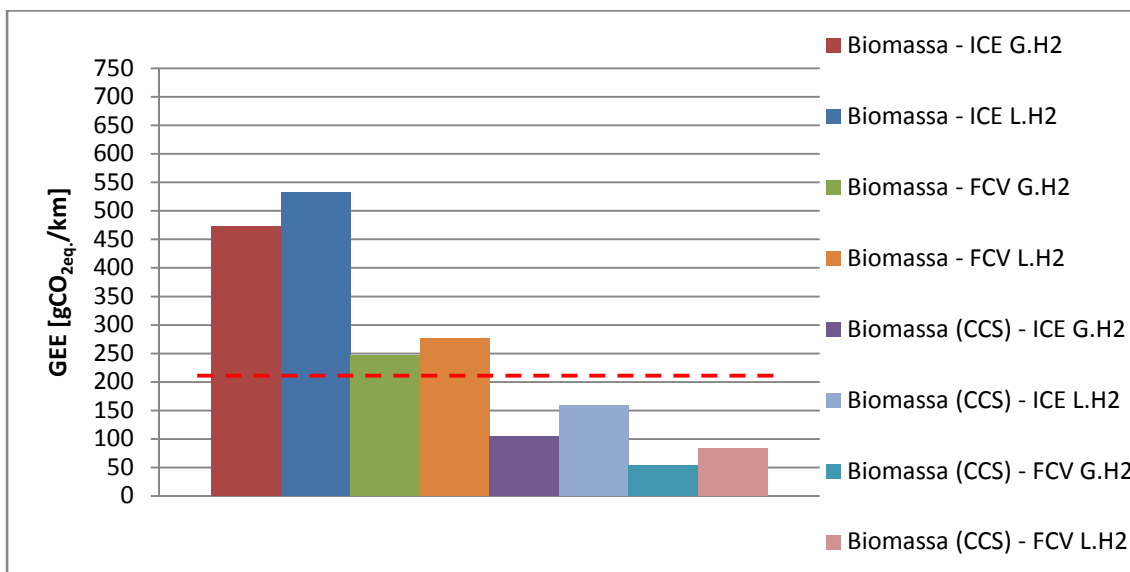


Figura 95 - Emissão de GEE WTW, com o H₂ produzido da biomassa.

Verifica-se mais uma vez que os veículos com L.H₂ possuem mais emissões, neste caso de GEE, por quilómetro percorrido que os com G.H₂, tendo em conta as considerações tomadas. Constata-se que a tecnologia CCS é essencial para que a produção de H₂ em plantas centralizadas por recurso a combustíveis fósseis seja, após aplicação do H₂ em veículos, competitiva com o veículo a gasolina ou até mesmo com os métodos de produção de H₂ por fontes renováveis de energia. Contudo dentro das fontes de energia fóssil, a produção de H₂ sem CCS por reformação a vapor do GN e utilização no estado gasoso em FCV possui menos emissão de GEE por quilómetro percorrido que o veículo base a gasolina. A poupança na emissão de GEE é de 42% no caso do G.H₂ produzido em estações de reabastecimento ou de 37,6% no caso do G.H₂ produzido em plantas centralizadas.

No entanto o G.H₂ produzido por electrólise com electricidade proveniente da energia eólica e aplicado em FCV é o que apresenta menores emissões de GEE por quilómetro, permitindo uma poupança de 85% face ao veículo convencional a gasolina. Em contra partida a electrólise com electricidade do sistema electroprodutor nacional para produção de L.H₂ e aplicação deste em veículos com ICE permite um aumento de 240% nas emissões de GEE por quilómetro percorrido face ao veículo base a gasolina, sendo esta a opção analisada com mais emissões de GEE.

Numa análise WTP o H₂ possui de um modo geral maior consumo energético e mais emissões por kWh disponível na estação de reabastecimento que a gasolina. Contudo após a aplicação em veículos, o H₂, dependendo da fonte de produção, torna-se competitivo com a gasolina. Este facto deve-se ao elevado consumo energético do veículo a gasolina na fase de operação. Na Figura 96 encontra-se de forma percentual, o consumo energético total WTW em cada fase, comparando os veículos FCV a G.H₂ com o veículo a gasolina. Efectuou-se a análise apenas para o FCV a G.H₂, pois a variação nos valores analisando com os veículos ICE a H₂ ou alterando o estado físico

do H_2 introduzido nos veículos é pouco relevante. A ideia é comparar o consumo de energia, nas diversas etapas, do veículo a gasolina com os veículos a H_2 .

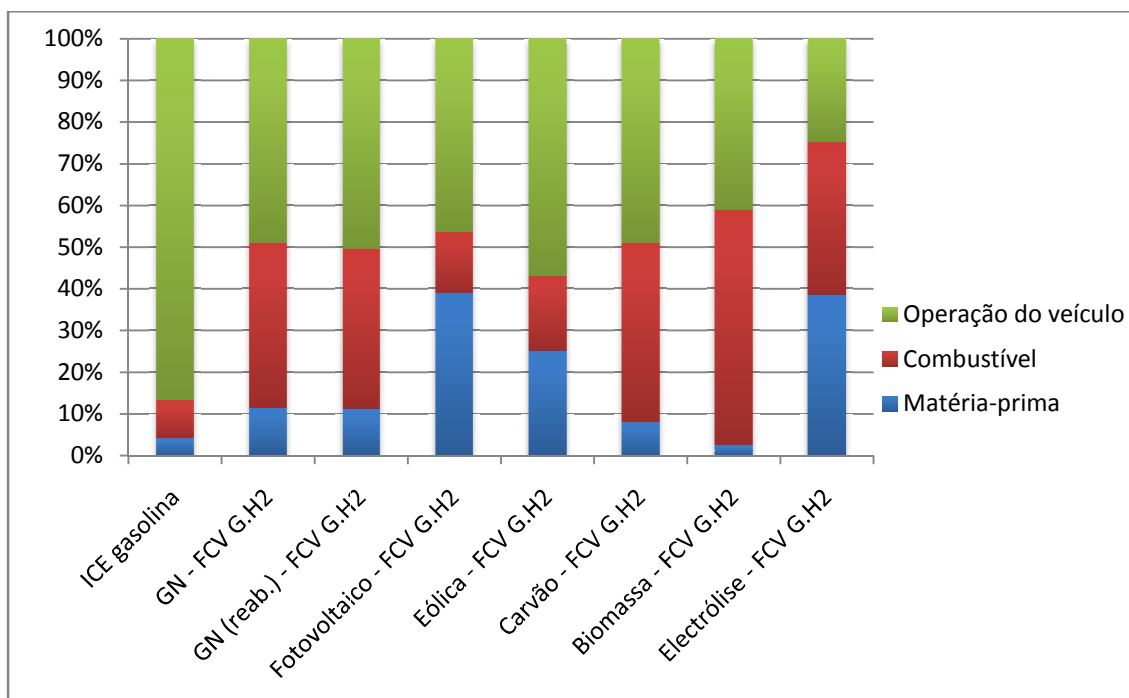


Figura 96 – Distribuição do consumo de energia total WTW nas várias etapas.

Na Figura 96 constata-se que numa análise WTW, num veículo com ICE a gasolina, 86,8% do consumo energético corresponde à fase de operação do veículo. No veículo com $G.H_2$ analisado, a fase de operação corresponde a aproximadamente 50% do consumo de energia total. Este valor varia um pouco, podendo ser superior ou inferior aos 50% dependendo da fonte da matéria-prima para produção do H_2 (Figura 96). O restante consumo energético é repartido pelas etapas de produção do combustível e da matéria-prima. No veículo a gasolina estas etapas possuem um consumo energético baixo relativamente à fase de operação. A fase de extracção do crude (matéria-prima) corresponde a 4% do consumo energético total e a da produção da gasolina (combustível) 9,2%.

Em relação aos GEE (Figura 97), verifica-se que 85,5% das emissões totais WTW com veículos a ICE a gasolina ocorrem na fase de operação do veículo. No caso dos veículos a H_2 analisados, a emissão de GEE na fase de operação é nula. Este facto ocorre uma vez que o FCV apenas apresenta emissão de PM na sua circulação, devido ao desgaste dos pneus. Deste modo as emissões de GEE no caso do H_2 vão ser repartidas pelas fases de produção e transporte da matéria-prima e do combustível, como se pode observar na Figura 97. No caso dos restantes poluentes a distribuição é semelhante à apresentada para os GEE, com excepção das PM, que na fase de operação do veículo representam a 4,4% das emissões totais de PM.

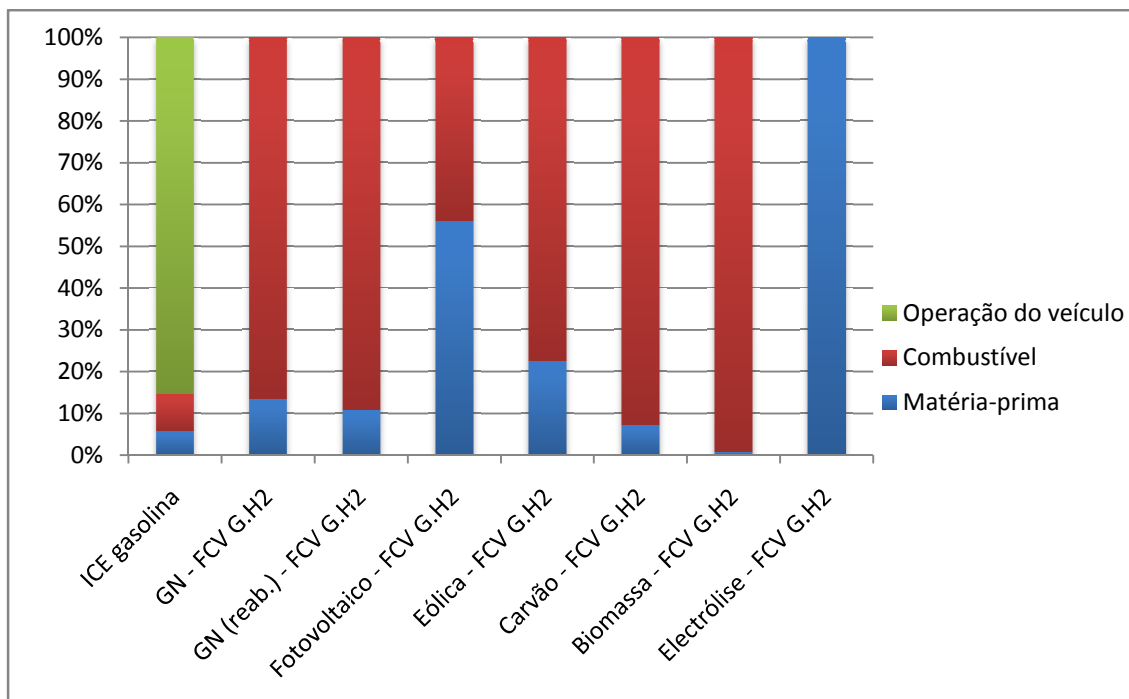


Figura 97 – Distribuição da emissão de GEE (WTW) nas várias etapas.

O elevado consumo energético e emissões de poluentes na fase de operação do veículo a gasolina justifica a diferença entre os dados WTP e os WTW. Na fase WTP apenas na emissão de VOC por kWh disponível no posto de reabastecimento, o H₂ apresenta alguns valores inferiores à gasolina. Contudo o elevado consumo energético da fase de operação do veículo a gasolina torna o H₂ por recurso a algumas matérias-primas competitivo com os veículos a gasolina em termos de consumos energéticos e emissões WTP.

De seguida será apresentado um resumo com a mesma codificação descrita na análise WTP. O resumo é apresentado em quatro quadros (do Quadro 62 ao 65), diferenciando desta forma os tipos de veículos a H₂ analisados (FCV e ICE) e o estado físico do H₂ aplicado nos veículos (G.H₂ e L.H₂).

Quadro 62 – Resumo WTW para veículos ICE a G.H₂ comparativamente ao ICE a gasolina.

	GN - ICE G.H ₂	GN (CCS) - ICE G.H ₂	GN (reab.) - ICE G.H ₂	PV - ICE G.H ₂	Eólica - ICE G.H ₂	Carvão - ICE G.H ₂	Carvão (CCS) - ICE G.H ₂	Bio - ICE G.H ₂	Bio (CCS) - ICE G.H ₂	Electrólise - ICE G.H ₂
Consumo energético	0	0	0	0	*	0	0	0	0	☹
VOC	**	**	**	***	**	**	**	**	**	☹
CO	**	**	**	☹	**	**	**	***	***	**
NO_x	0	0	0	0	*	0	0	0	0	☹
PM	0	0	0	0	*	☹	☹	0	0	0
GEE	0	**	0	**	***	0	**	0	**	☹

*** - Melhor de todos; ** - Melhor que a gasolina; * - Pior que a gasolina, mas melhor de todos os H₂; 0 – Pior que a gasolina, mas entre o melhor e o pior dos H₂; ☹ - Pior processo de produção de H₂ (mas melhor que a gasolina); ☹ - Pior de todos (inclusive que a gasolina).

Quadro 63 – Resumo WTW para veículos ICE a L.H₂ comparativamente ao ICE a gasolina.

	GN - ICE L.H ₂	GN (CCS) - ICE L.H ₂	GN (reab.) - ICE L.H ₂	PV - ICE L.H ₂	Eólica - ICE L.H ₂	Carvão - ICE L.H ₂	Carvão (CCS) - ICE L.H ₂	Bio - ICE L.H ₂	Bio (CCS) - ICE L.H ₂	Electrólise - ICE L.H ₂
Consumo energético	0	0	0	0	*	0	0	0	0	☹
VOC	**	**	**	***	**	**	**	**	**	☹
CO	**	**	**	☹	**	**	**	***	***	0
NOx	0	0	0	0	*	0	0	0	0	☹
PM	0	0	0	0	*	0	0	0	0	☹
GEE	0	**	0	**	***	0	**	0	**	☹

Quadro 64 – Resumo WTW para veículos FCV a G.H₂ comparativamente ao ICE a gasolina.

	GN - FCV G.H ₂	GN (CCS) - FCV G.H ₂	GN (reab.) - FCV G.H ₂	PV - FCV G.H ₂	Eólica - FCV G.H ₂	Carvão - FCV G.H ₂	Carvão (CCS) - FCV G.H ₂	Bio - FCV G.H ₂	Bio (CCS) - FCV G.H ₂	Electrólise - FCV G.H ₂
Consumo energético	**	**	**	**	***	**	**	**	**	☹
VOC	**	**	**	***	**	**	**	**	**	☹
CO	**	**	**	☹	**	**	**	***	***	**
NOx	0	0	0	0	***	0	0	0	0	☹
PM	0	0	0	0	*	☹	☹	0	0	0
GEE	**	**	**	**	***	0	**	0	**	☹

Quadro 65 – Resumo WTW para veículos FCV a L.H₂ comparativamente ao ICE a gasolina.

	GN - FCV L.H ₂	GN (CCS) - FCV L.H ₂	GN (reab.) - FCV L.H ₂	PV - FCV L.H ₂	Eólica - FCV L.H ₂	Carvão - FCV L.H ₂	Carvão (CCS) - FCV L.H ₂	Bio - FCV L.H ₂	Bio (CCS) - FCV L.H ₂	Electrólise - FCV L.H ₂
Consumo energético	**	**	0	**	***	**	**	0	0	☹
VOC	**	**	**	***	**	**	**	**	**	☹
CO	**	**	**	☹	**	**	**	***	***	**
NOx	0	0	0	0	*	0	0	0	0	☹
PM	0	0	0	0	*	0	0	0	0	☹
GEE	**	**	**	**	***	0	**	0	**	☹

Verifica-se que o H₂ enquanto combustível, numa análise WTP, apresenta de um modo geral piores resultados em termos de consumos energéticos e emissões de poluentes. Contudo a aplicação do H₂ no sector automóvel, nomeadamente em FCV, apresenta algumas vantagens relativamente à gasolina aplicada em veículos ICE. Mesmo utilizando a electricidade do sistema electroprodutor nacional na fase de compressão, a electrólise com electricidade proveniente da energia eólica apresenta-se de um modo geral a melhor forma para produção de H₂ e posterior utilização em veículos (ver do Quadro 62 ao 65). A electrólise com electricidade do sistema electroprodutor nacional para produção de H₂ e posteriormente aplicação em veículos é desaconselhável do ponto de vista energético e de emissão de poluentes. Constatam-se também uma clara vantagem

em relação a consumos energéticos e emissões de poluentes, dos FCV relativamente aos veículos com ICE a H_2 . De salientar os resultados do H_2 produzido por reformação a vapor do GN e aplicado em FCV ligeiros de passageiros. Este apenas apresenta piores resultados que a gasolina em termos de emissão de NO_x e PM por quilómetro percorrido. O GN apesar de ser um combustível fóssil, apresenta numa análise WTW, resultados próximos da energia fotovoltaica para produção de H_2 .

Numa análise WTW, o $G.H_2$ produzido por electrólise com electricidade proveniente da energia eólica e aplicado em FCV apresenta os melhores resultados. Este é apenas pior que a gasolina aplicada em veículos com ICE, na emissão de PM por quilómetro percorrido. No entanto o valor de emissão de PM por quilómetro do FCV a $G.H_2$ é próximo do veículo ICE a gasolina.

6. Conclusões e Trabalho Futuro

O trabalho realizado na presente Dissertação de Mestrado teve como principal objectivo a elaboração de uma ferramenta numérica de ACV do vector energético H_2 contemplando a realidade nacional, mas baseada no modelo GREET desenvolvido pela Argonne National Laboratory [71]. Contudo, as limitações do modelo GREET em termos de energias renováveis levaram à necessidade de ir mais além do pretendido. As fontes de energia renovável, nomeadamente a energia fotovoltaica e a energia eólica, têm sido apontadas como fontes energéticas para o futuro; no entanto, existem emissões e consumos energéticos associados à fase de produção tanto das torres eólicas como dos painéis fotovoltaicos. O modelo GREET não considera as emissões na fase de produção das torres eólicas e dos painéis fotovoltaicos, sendo que deste modo a produção de H_2 por estas fontes teria emissão zero numa análise WTP, o que não seria real. De forma a superar esta limitação, gerou-se uma interacção entre o modelo GREET e o modelo Alemão GEMIS [75]. Esta interacção levou à criação do modelo MACV2 H_2 .

Efectuou-se um levantamento de informação das diversas fases do ciclo de vida do H_2 para adaptar o modelo GREET à realidade nacional. Contudo houve secções onde não foi possível a recolha de dados para a realidade nacional (como as do peso relativo das tecnologias de combustão estacionária no processo de produção dos combustíveis e as do peso relativo de cada um dos combustíveis utilizados na extracção ou produção dos combustíveis), mantendo-se os valores de referência do modelo GREET. No entanto, os processos de extracção e produção de combustíveis são globais, ou seja, encontram-se implementados à escala mundial. Deste modo os pressupostos não estarão muito desfasados da realidade nacional. As maiores discrepâncias entre as realidades Portuguesa e a Americana residem nos veículos e na produção de energia eléctrica.

Segundo os dados da Agência Internacional da Energia referentes a 2007, constatou-se que em Portugal 65% da produção de energia eléctrica é efectuada por combustíveis fósseis em centrais térmicas [4]. Deste modo, devido à baixa eficiência das tecnologias de combustão estacionária, geram-se elevados consumos de energia e emissões de poluentes na produção de energia eléctrica nacional.

Relativamente aos veículos, efectuou-se um levantamento das expressões matemáticas contidas no *Emission Inventory Guidebook* [84]. As expressões foram introduzidas no modelo MACV2 H_2 e permitiram obter o consumo de combustível e as emissões de poluentes para uma determinada velocidade média de percurso, situação que o modelo GREET não permitia simular directamente.

Em relação aos veículos ligeiros de passageiros, efectuou-se a análise para FCV, veículos com ICE e para HEV com ICE, todos a H_2 . O BMW mono-fuel hydrogen foi o veículo com ICE a H_2 seleccionado para o estudo. Verificou-se que o consumo de H_2

aos 100 km, apresentado pelo MACV2H₂, para uma velocidade de 115 km/h é igual ao expresso pelo fabricante como consumo do veículo em auto-estrada. No FCV a variação entre os dados do modelo e os fornecidos pelo fabricante é superior. No entanto o fabricante (FIAT) apenas expressa o consumo referindo que ocorre em circuito urbano, não indicando a velocidade de testes do Panda FCV. Visto que apenas para a velocidade de 35 km/h o modelo excede os consumos do fabricante em 16% considera-se que os valores são aceitáveis. No caso do HEV com ICE a H₂, os consumos de combustível dados pelo modelo MACV2H₂, encontram-se todos dentro da gama de valores fornecida pela fabricante do Toyota Quantum Prius. Sendo assim conclui-se que o modelo MACV2H₂ representa com boa precisão a realidade dos veículos ligeiros de passageiros a H₂, sendo estes a combustão interna, a célula de combustível ou híbridos eléctricos independentes da rede.

Relativamente aos motociclos com cilindrada inferior a 50 cm³, o modelo apenas permite a simulação em circuito urbano. Deste modo efectuou-se a análise para a scooter ZES, apresentando o modelo um consumo de combustível 6% inferior ao apresentado pelo fabricante para circuito urbano (sendo 0,17 kg_{H2}/100km no caso do MACV2H₂ e 0,18 kg_{H2}/100km no caso do fabricante). Constata-se que a variação é inferior a 10%, concluindo-se deste modo que o modelo também apresenta com rigor os dados para os motociclos a H₂ com cilindrada inferior a 50 cm³.

Para os veículos pesados de passageiros foram efectuadas duas análises, ambas para FCV a H₂. Inicialmente analisou-se o Mercedes Citaro que circulou na cidade do Porto ao abrigo do projecto CUTE. Neste percurso o modelo apresenta valores de consumo de combustível inferiores em 53% no caso do veículo a H₂ e 24% no caso do veículo a gasóleo relativamente aos valores reais registados. Estes resultados devem-se em parte à característica da via por onde os veículos circularam. O percurso efectuado pelos veículos pesados de mercadorias apresenta declives superiores a 10%, facto que o modelo não permite simular. A restante diferença entre o veículo a H₂ e o a gasóleo é justificada em parte pelo acréscimo de peso proporcionado pelo sistema de armazenamento do H₂ (mais 2,5t no veículo a H₂), facto que não é possível diferenciar no modelo MACV2H₂. O referido aumento de peso juntamente com o efeito de “*power dump*” pode originar um aumento de consumo de combustível de cerca de 25% [45]. De forma a tentar tirar conclusões mais concretas relativamente à credibilidade dos dados de consumo de combustível dos veículos pesados de passageiros a H₂, efectuou-se uma análise com o MAN NL 263 FC incorporado no projecto Bavarian. A maior discrepância com os dados fornecidos pelo fabricante Alemão foi obtida para a velocidade de 13,6 km/h. Neste caso o modelo apresentou um consumo inferior a 10%. Pode-se concluir deste modo que o modelo MACV2H₂ na análise de veículos pesados de passageiros se encontra mais adequado para simulações sem grandes alterações topográficas.

O caso de estudo considerado reporta à ligação Lisboa (Oceanário) - Porto (Casa da musica), sendo que as plantas centralizadas de H₂ se localizam em Sines. Para o referido percurso, efectuado essencialmente em auto-estrada, efectuou-se as análises WTP e

WTW. Na fase de operação dos veículos, optou-se por efectuar a análise com veículos ligeiros de passageiros, devido ao peso que representam no consumo energético do sector dos transportes.

Começando pela análise WTP, que fornece o consumo energético e as emissões de poluentes por kWh disponível na estação de reabastecimento, verifica-se uma vantagem da gasolina relativamente ao H₂ produzido pelas diversas formas. Verifica-se que em termos de unidade de energia de combustível disponível na estação de reabastecimento, a produção de H₂ por electrólise da electricidade do sistema electroprodutor nacional apresenta mais emissões (com excepção do CO) e consumos energéticos que as restantes formas de produção de H₂ analisadas. As emissões são sempre superiores às da gasolina (de 64% no VOC a 4407% nas PM para o G.H₂ e de 105% no VOC a 5510% nas PM para o L.H₂). O consumo energético do G.H₂ produzido por electrólise da electricidade do sistema electroprodutor nacional é 20 vezes superior ao da gasolina. Este facto deve-se ao elevado consumo energético na produção de electricidade proporcionado pela forte dependência de combustíveis fósseis (65%) e pela baixa eficiência das tecnologias de combustão estacionária. No entanto a electrólise também apresenta os melhores resultados na produção de H₂. Neste caso é utilizada a electricidade proveniente da energia eólica para produção de H₂ por electrólise. No entanto apesar de ser a forma, das analisadas, com menor consumo energético na produção de H₂, os valores são 398% superiores aos registados pela gasolina. Contudo, ao analisar em termos de consumo de energia fóssil por unidade de energia disponível, a diferença entre ambos é menor. Neste caso o G.H₂ apresenta um consumo de energia fóssil 113% superior à gasolina. Relativamente à emissão de poluentes (com excepção do VOC) a situação é semelhante, ou seja, com excepção do VOC, a gasolina apresenta menos emissão de poluentes por unidade de energia disponível na estação de reabastecimento (de 136% para o caso do NO_x a 235% para as PM) que o. A gasolina apresenta mais 77% de emissões de VOC por unidade de energia disponível que o G.H₂ produzido por electrólise da electricidade proveniente da energia fotovoltaica. Apenas o H₂ (G.H₂ ou L.H₂), produzido por gaseificação do carvão e por electrólise da electricidade do sistema electroprodutor nacional, apresenta mais emissões VOC por unidades de energia disponível (2% e 64% respectivamente para o G.H₂ e para o L.H₂ 19% e 105% respectivamente) do que a gasolina. Constata-se que não há um processo e uma matéria-prima para produção de H₂ que seja melhor em todos os poluentes analisados, como se pode ver no Quadro 66 para produção e distribuição de G.H₂ e no Quadro 67 para L.H₂. Nos referidos quadros, a amarelo encontra-se o melhor processo e matéria-prima para produção de H₂, relativamente à emissão de determinado poluente. Com destaque a vermelho, é indicado o processo e a matéria-prima que apresenta mais emissões de determinado poluente para produção de H₂. Verifica-se que nenhuma matéria-prima associada a um processo de produção de H₂, apresenta sempre os piores ou os melhores resultados, em termos de emissão de todos os poluentes por unidade de energia disponível. De um modo geral, pode-se concluir que a produção de H₂ por electrólise da electricidade proveniente da energia eólica apresenta vantagem global relativamente às restantes formas analisadas. Contudo tanto os consumos energéticos

como as emissões de poluentes por unidade de energia disponível serem superiores às da gasolina. Do mesmo modo, verifica-se que numa análise WTP, a produção de H₂ por electrólise da electricidade do sistema electroprodutor nacional apresenta os piores resultados.

Quadro 66 – Variações nas emissões WTP do G.H₂ relativamente à gasolina.

	GN em G.H ₂	GN (CCS) em G.H ₂	GN (reab.) em G.H ₂	Fotovoltaico em G.H ₂	Eólica em G.H ₂	Carvão em G.H ₂	Carvão (CCS) em G.H ₂	Biomassa em G.H ₂	Biomassa (CCS) em G.H ₂	Electrólise em G.H ₂
VOC	-57%	-57%	-61%	-77%	-38%	2%	2%	-74%	-74%	64%
CO	508%	508%	447%	6615%	342%	519%	519%	184%	184%	2642%
NO _x	389%	389%	277%	217%	136%	763%	763%	220%	220%	1602%
PM	511%	511%	535%	636%	235%	4889%	4889%	268%	268%	4407%
GEE	886%	417%	817%	315%	136%	1618%	397%	1714%	297%	2154%

Quadro 67 – Variações nas emissões WTP do L.H₂ relativamente à gasolina.

	GN em L.H ₂	GN (CCS) em L.H ₂	GN (reab.) em L.H ₂	Fotovoltaico em L.H ₂	Eólica em L.H ₂	Carvão em L.H ₂	Carvão (CCS) em L.H ₂	Biomassa em L.H ₂	Biomassa (CCS) em L.H ₂	Electrólise em L.H ₂
VOC	-40%	-40%	-21%	-60%	-21%	19%	19%	-57%	-57%	103%
CO	809%	809%	1142%	6968%	642%	820%	820%	482%	482%	3313%
NO _x	497%	497%	690%	324%	242%	875%	875%	327%	327%	2018%
PM	1018%	1018%	1628%	1043%	740%	5434%	5434%	774%	774%	3510%
GEE	1074%	602%	1365%	527%	346%	1841%	609%	1939%	508%	2706%

Verifica-se, que para o caso de estudo analisado, o L.H₂ possui maior consumo energético e mais emissões de poluentes por unidade de energia disponível na estação de reabastecimento que o G.H₂. Em geral na produção de L.H₂ o processo com maior consumo energético é a liquefacção. Apenas na gaseificação da biomassa o processo de produção supera em termos de consumo energético o processo de liquefacção. A eficiência do processo de liquefacção é inferior à do processo de compressão em 12% em plantas centralizadas e 23% em estações de reabastecimento. Este facto proporciona maior consumo de energia para liquefazer o H₂ que para comprimir. Como agravante vem o facto destes processos serem efectuados com electricidade do sistema electroprodutor nacional, que como referido possui um elevado consumo de energia por unidade de energia eléctrica disponível, devido à grande dependência dos combustíveis fósseis. Na produção de G.H₂, o processo com maior consumo de energia é o de produção, com a excepção da produção de G.H₂ por electrólise da electricidade proveniente dos painéis fotovoltaicos em que a fase de produção do H₂ apresenta um consumo de energia 13% inferior à fase de produção e distribuição dos painéis fotovoltaicos. O transporte do G.H₂, apesar de representar cerca de 9% do consumo de energia total WTP na produção do H₂, apresenta uma fatia mais significativa no consumo de energia que o transporte do L.H₂ (que corresponde a 1%). Contudo a diferença no consumo energético entre o transporte de G.H₂ e L.H₂ não supera a diferença do consumo de energia entre a liquefacção e a compressão do H₂, apresentando deste modo o L.H₂ maior consumo de energia e mais emissões de poluentes WTP. De salientar o facto do transporte de G.H₂ ser mais sensível à distância a percorrer que o transporte de L.H₂, devido à baixa densidade do G.H₂.

Posteriormente efectuou-se uma análise WTW, ou seja, aplicou-se o H₂ produzido pelas diversas formas analisadas anteriormente (WTP) em veículos ICE e FCV a H₂ (tanto G.H₂ como L.H₂) e comparou-se com o veículo ICE a gasolina. Os resultados apresentam diferenças significativas relativamente aos WTP. Neste caso verifica-se que algumas das matérias-primas analisadas para produção de H₂ e posterior aplicação nos veículos permitem menor consumo energético e emissão de poluentes por quilómetro percorrido que o veículo ICE a gasolina.

O H₂ aplicado em FCV apresenta menos consumo energético e emissão de poluentes por quilómetro percorrido (WTW) do que quando aplicado em veículos ICE. O FCV a H₂ na fase de operação do veículo apenas emite PM associado à travagem e ao desgaste dos pneus. A produção de H₂ por electrólise e posterior aplicação em veículos apresenta os melhores e os piores resultados em termos de emissão de poluentes e consumo energético WTW, dependendo a fonte de energia utilizada para produção da electricidade. A utilização de energia eólica para produção de electricidade, que é posteriormente usada para produção de H₂ por electrólise, permite os melhores resultados WTW. O G.H₂ proveniente da energia eólica aplicado em FCV permite mesmo melhores resultados que o veículo ICE a gasolina relativamente a consumos energéticos e a emissões de poluentes por quilómetro percorrido (com excepção das PM). O H₂ produzido por electrólise da electricidade do sistema electroprodutor nacional e aplicado em veículos proporciona os piores resultados de consumos energéticos e emissões WTW. No quadro seguinte pode-se observar as variações do G.H₂ aplicado em veículos, com o melhor e o pior cenário de produção de H₂, assim como o cenário mais utilizado actualmente (reformação a vapor do GN). De salientar que independentemente da matéria-prima (das analisadas) utilizada na produção de H₂, os veículos a H₂ nunca apresentam menos emissões WTW de PM que o veículo convencional a gasolina.

Quadro 68 – Variação no consumo energético e nas emissões WTW, dos veículos a G.H₂ relativamente ao ICE a gasolina.

	GN – ICE G.H ₂	GN – FCV G.H ₂	GN (CCS) – ICE G.H ₂	GN (CCS) – FCV G.H ₂	Eólica – ICE G.H ₂	Eólica – FCV G.H ₂	Electrólise – ICE G.H ₂	Electrólise – FCV G.H ₂
Consumo de energia total	48%	-23%	48%	-23%	27%	-34%	189%	51%
Consumo de energia fóssil	45%	-24%	46%	-24%	-77%	-88%	141%	26%
VOC	-68%	-86%	-68%	-86%	-56%	-80%	8,2%	-46%
CO	-64%	-92%	-64%	-92%	-69%	-94%	-6,8%	-62%
NO _x	255%	76%	255%	76%	80%	-15%	1094%	514%
PM	192%	75%	192%	75%	82%	18%	1746%	886%
GEE	20%	-38%	-37%	-67%	-71%	-85%	174%	43%

Devido ao elevado consumo energético e emissões de poluente do veículo convencional a gasolina, o H₂ produzido por algumas das matérias-primas analisadas e aplicado em veículos apresenta melhores resultados. Este facto justifica a grande discrepância entre os resultados WTP e WTW.

Do ponto de vista energético e ambiental o H_2 enquanto combustível (WTP) é pior que a gasolina. Contudo o H_2 apresenta potencial para aplicação no sector dos transportes, devido ao elevado consumo energético e emissões dos veículos convencionais. No caso dos FCV, como não apresentam emissões de GEE na fase de operação, o total das emissões encontra-se dividido entre a fase de produção e transporte da matéria-prima e a de produção e distribuição do H_2 enquanto combustível. Em contrapartida no caso do veículo a gasolina a fase de operação é responsável por 86% das emissões WTW de GEE.

Algumas das ideias para um trabalho futuro poderão completar o modelo, nomeadamente:

- Melhorar a base de dados do MACV2 H_2 , alterando os dados onde não foi possível a recolha da realidade nacional, nomeadamente, o peso relativo das tecnologias de combustão estacionária no processo de produção dos combustíveis e as do peso relativo de cada um dos combustíveis utilizados na extracção ou produção dos combustíveis;
- Efectuar outros ensaios, ou seja, por exemplo uma análise WTP e WTW, com L. H_2 em que a liquefacção utiliza electricidade oriunda de outra fonte que não o sistema electroprodutor nacional. Um bom exemplo seria efectuar uma ACV do H_2 utilizando como fonte da electricidade utilizada nos processos de compressão e de liquefacção a energia eólica. A referida análise é interessante do ponto de vista energético e ambiental, uma vez que a electricidade do sistema electroprodutor apresenta um elevado consumo de energia por unidade de energia disponível;
- O mesmo ensaio poderia ser efectuado para o processo de compressão na produção do G. H_2 ;
- Incluir no modelo uma análise económica, permitindo desta forma comparar não só a diferença em consumos energéticos e emissões de poluentes como em custos.

7. Referências

1. BP, *BP Statistical Review of World Energy*, 2009.
2. Sousa, L., Portal da Energia, O Pico do Petróleo, 2009, [consultado em Fevereiro de 2010], Disponível na Internet: <http://www.energiasportal.com>.
3. Europes's Energy Portal, Bruxelas, 2010, [consultado em Fevereiro de 2010], Disponível na Internet: <http://www.energy.eu/>.
4. IEA, International Energy Agency, 2010, [consultado em Fevereiro de 2010], Disponível na Internet: <http://www.iea.org/about/index.asp>.
5. APA, *REA 2008 – Relatório do Ambiente*, Agência Portuguesa do Ambiente, 2009.
6. Cetelem, *O Observador – O automóvel não poluente: que futuro?*, 2009.
7. APA, *REA 2007 – Relatório do Ambiente*, Agência Portuguesa do Ambiente, 2008.
8. Eurostat, *Energy, transport and environment indicators*, European Commission, 2008.
9. Presidência de Conselho de Ministros, *Resolução do Conselho de Ministros n.º 104/2006*, Diário da Republica, 1ª Série, N.º 162, 23 de Agosto de 2006.
10. EEA, *Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2008 – Tracking progress towards Kyoto targets*, European Environment Agency, 2008.
11. EC, *Hydrogen Energy and Fuel Cells – A vision of our future*, European Commission, 2003.
12. BMW Portugal, CleanEnergy, 2010, [consultado em Março de 2010], Disponível na Internet: <http://www.bmw.pt/>.
13. Rutgers, Edward J. Bloustein School of Planning and Public, Hydrogen Learning Center, 2008, [consultado em Maio de 2010], Disponível na Internet: <http://www.policy.rutgers.edu/ceeep/hydrogen>.
14. Hychain, 2010, Hydrogen Challenge, [consultado em Março de 2010], Disponível na Internet: <http://www.hychain.org>.
15. HyFLEET: CUTE, [consultado em Março de 2010], Disponível na Internet: <http://www.global-hydrogen-bus-platform.com>.
16. HyFLEET: CUTE, *Hydrogen Transports – Bus Technology & Fuel for Today and for a Sustainable Future*, 2009.
17. Government of Western Australia, Department of Transport, Alternative Transport, EcoBus, [consultado em Março de 2010], Disponível na Internet: <http://www.transport.wa.gov.au/greentransport/19524.asp>.
18. Zero Regio, 2005, [consultado em Março de 2010], Disponível na Internet: <http://www.zeroregio.com>.
19. College of the Desert, *Module 1: Hydrogen Properties*, 2001.
20. Santos, F.M., and Santos, F.A., *O combustível “Hidrogénio”*, Educação, Ciência e Tecnologia, Instituto Superior Politécnico de Viseu,.
21. IEA, *Hydrogen Production and Storage – R&D Priorities and Gaps*, International Energy Agency, 2006.

22. U.S. DOE, Energy Efficiency & Renewable Energy, U.S. Department of Energy, 2010, [consultado em Fevereiro de 2010], Disponível na Internet: <http://www.eere.energy.gov>.
23. New York State, *Hydrogen Production – Steam Methane Reforming (SMR)*, New York State Energy Research and Development Authority, 2010.
24. Farinha, J., *Reformação do metano com vapor de água em reformador de escala laboratorial*, Instituto Superior Técnico, p. 115, 2008.
25. Ni, M., Leung, D., Leung, M., Sumathy, K., *An overview of hydrogen production from biomass*, Fuel Processing Technology, 87(5): p. 461-472, 2006.
26. Luo, S., Xiao, B., Guo, X., Hu, Z., Liu, S., He, M., *Hydrogen-rich gas from catalytic steam gasification of biomass in a fixed bed reactor: Influence of temperature and steam on gasification performance*, International Journal of Hydrogen Energy, 34(5): p. 2191-2194, 2009.
27. AREAM, *H₂ - A Economia do Hidrogénio*, Agência Regional da Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira.
28. Zeng, K., Zhang, D., *Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications*, Progress in Energy and Combustion Science, 36(3): p. 307-326.
29. Barbir, F., *PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources*, Solar Energy, 2005, 78(5): p. 661-669.
30. Hino, R., Haga, K., Aita, H., Sekita, K., 38. *R&D on hydrogen production by high-temperature electrolysis of steam*, Nuclear Engineering and Design, 2004, 233(1-3): p. 363-375.
31. Brisse, A., Schefold, J., Zahid, M., *High temperature water electrolysis in solid oxide cells*, International Journal of Hydrogen Energy, 33(20): p. 5375-5382, 2008.
32. Fujiwara, S., Kasai, S., Yamauchi, H., Yamada, K., Makino, S., Matsunaga, K., Yoshino, M., Kameda, T., Ogawa, T., Momma, S., Hoashi, E., *Hydrogen production by high temperature electrolysis with nuclear reactor*, Progress in Nuclear Energy, 50(2-6): p. 422-426.
33. Brudnik, A., Gorzkowska-Sobas, A., Pamula, E., Radecka, M., Zakrzewska, K., *Thin film TiO₂ photoanodes for water photolysis prepared by dc magnetron sputtering*, Journal of Power Sources, 173(2): p. 774-780, 2007.
34. Das, D., Veziroglu T., *Advances in biological hydrogen production processes*, International Journal of Hydrogen Energy, 33(21): p. 6046-6057, 2008.
35. Hallenbeck, P., Benemann, J., *Biological hydrogen production; fundamentals and limiting processes*, International Journal of Hydrogen Energy, 27(11-12): p. 1185-1193.
36. Hofmann, D., Jockenhövel, T., Rosenbauer, G., *Carbon Capture Technologies for European Market*, Siemens, Answers for energy, 2008.
37. Queensland Government, Economic Development and Innovation, 2010, [consultado em Março de 2010], Disponível na Internet: <http://www.energyfutures.qld.gov.au/>.

38. Capture Ready, How does CCS Work, 2008, [consultado em Março de 2010], Disponível na Internet: <http://www.captureready.com/en>.
39. U.S. DOE, Energy Efficiency & Renewable Energy, Hydrogen Storage, U.S. Department of Energy, 2010, [consultado em Março de 2010], Disponível na Internet: <http://www.eere.energy.gov>.
40. Coelho, M.C., Titus, E., Cabral, G., Neto, V., Madaleno, J.C., Fan, Q.H., Sousa, A.C., Grácio, J., *Hydrogen adsorption onto nickel modified carbon nanotubes*, Journal of nanoscience and nanotechnology, 2008
41. U.S. DOE, *Hydrogen Distribution and Delivery Infrastructure*, U.S. Department of Energy, 2006.
42. HyChain, *Projecto HyChain*, Hydrogen Challenge.
43. AP2H2, Associação Portuguesa para a Promoção do Hidrogénio, 2010, [consultado em Junho de 2010], Disponível na Internet: <http://www.ap2h2.pt>.
44. Frey, H.C., Roupail, N.M., Zhai, H., Farias, T.L., Gonçalves, G.A., *Comparing real-world fuel consumption for diesel- and hydrogen-fueled transit buses and implication for emissions*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 12(4): p. 281-291, 2007.
45. Saxe, M., Folkesson, A., Alvfors, P., *Energy system analysis of the fuel cell buses operated in the project: Clean Urban Transport for Europe*, Energy, 33(5): p. 689-711, 2008.
46. Fuel Cell Bus Club, CUTE, Porto, <http://www.fuel-cell-bus-club.com>, consultado a 14-03-2010.
47. CUTE, *Clean Urban Transport for Europe - Project No. NNE5-2000-00113*, Fuel Cell Bus Club, 2006.
48. INEGI, *inegi noticias, Boletim Informativo*, nº27, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, 2008.
49. INEGI, Projecto LUCIS, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, [consultado em Junho de 2010], Disponível na Internet: <http://www.inegi.up.pt>.
50. EDEN, Endogenizar o Desenvolvimento das Energias Novas, [consultado em Junho de 2010], Disponível na Internet: <http://www.h2eden.inegi.up.pt>.
51. INEGI, EDEN pretende criar plataforma tecnológica nacional de oportunidades para a economia do hidrogénio, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, 2007, [consultado em Junho de 2010], Disponível na Internet: <http://www.inegi.up.pt>.
52. AREAM, EDEN - Endogenizar o Desenvolvimento de Energias Novas, Agência Regional da Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira, 2008, [consultado em Junho de 2010], Disponível na Internet: <http://www.arem.pt>.
53. TVenergia, Projecto EDEN, [consultado em Junho de 2010], Disponível na Internet: <http://tvenergia.wordpress.com>.
54. Governo dos Açores, PRAI-Açores, [consultado em Junho de 2010], Disponível na Internet: <http://www.azores.gov.pt>.
55. LAMTec, Projectos PRAI, PTEC - Parque Tecnológico Interactivo em Energias Renováveis e Hidrogénio Renovável nos Açores, Laboratório de Ambiente

- Marinho e Tecnologia, [consultado em Junho de 2010], Disponível na Internet: <http://www.lamtec-id.com>.
56. LAMTec, Projectos INTERREG, Hymac, Laboratório de Ambiente Marinho e Tecnologia, [consultado em Junho de 2010], Disponível na Internet: <http://www.lamtec-id.com>.
 57. LAMTec, Projectos INTERREG, Hydrobus, Laboratório de Ambiente Marinho e Tecnologia, [consultado em Junho de 2010], Disponível na Internet: <http://www.lamtec-id.com>.
 58. HYRREG, 2010, [consultado em Junho de 2010], Disponível na Internet: <http://www.hyrreg.eu>.
 59. SUDOE Interreg IV B, *HYRREG*, 2010, [consultado em Junho de 2010], Disponível na Internet: <http://www.interreg-sudoe.eu>.
 60. Koroneos, C., et al., *Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes*, International Journal of Hydrogen Energy, 29(14): p. 1443-1450, 2004.
 61. Koroneos, C., Dompros, A., Roumbas, G., Moussiopoulou, N., *Advantages of the use of hydrogen fuel as compared to kerosene*, Resources, Conservation and Recycling, 44(2): p. 99-113, 2005.
 62. Koroneos, C., Dompros, A., Roumbas, G., *Hydrogen production via biomass gasification--A life cycle assessment approach*, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 47(8): p. 1261-1268, 2007.
 63. Utgikar, V., Thiesen, T., *Life cycle assessment of high temperature electrolysis for hydrogen production via nuclear energy*, International Journal of Hydrogen Energy, 31(7): p. 939-944, 2006.
 64. Joseck, F., Wang, M., Wu, Y., *Potential energy and greenhouse gas emission effects of hydrogen production from coke oven gas in U.S. steel mills*, International Journal of Hydrogen Energy, 33(4): p. 1445-1454, 2008.
 65. Dufour, J., Gálvez, J.L., Serrano, D.P., Moreno, J., Martínez, G., *Life cycle assessment of hydrogen production by methane decomposition using carbonaceous catalysts*, International Journal of Hydrogen Energy, 35(3): p. 1205-1212, 2010.
 66. Ferreira, J., *Análise de ciclo de vida dos produtos*, Instituto Politécnico de Viseu, 2004.
 67. Ferrão, P., *A Avaliação do Ciclo de Vida*, Ecologia Industrial: Princípios e Ferramentas, 1ª ed. IST Press, Lisboa. 398, 2009.
 68. U.S. DOE, *Life-Cycle Thinking for the Oil and Gas Exploration and Production Industry*, U.S. Department of Energy, Argonne National Laboratory, 2007.
 69. U.S. DOE, GREET, U.S. Department of Energy, Argonne National Laboratory, Transportation Technology R&D Center, 2010, [consultado em Março de 2010], Disponível na Internet: <http://www.transportation.anl.gov/>.
 70. NETPAS, version Distance 2.5, Smart Maritime Business, 2010, [consultado em Março de 2010], Disponível na Internet: <http://www.netpas.net>.

71. GREET, version 1.8c.0, Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation, 2009, [consultado em Março de 2010], Disponível na Internet: http://transportation.anl.gov/modeling_simulation/GREET/index.html.
72. Jornal Oficial da União Europeia, *Directiva 2003/17/CE*, Parlamento Europeu, 2003, consultado a 19-04-2010.
73. Forster P., Ramaswamy, V., *Climate Change - The Physical Science Basis, Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*, 1ª ed. Published for the Intergovernmental Panel, 987, 2007.
74. IUPAC, *Periodic Table of the Elements*, International Union of Pure and Applied Chemistry, 2005.
75. GEMIS, version 4.5, Global Emission Model Integrated Systems, 2010, [consultado em Março de 2010], Disponível na Internet: <http://www.oeko-institut.org/service/gemis/index.htm>.
76. EEA, *Other Mobile Sources & Machinery*, European Environment Agency, Emission Inventory Guidebook, 2007.
77. EC, Well-to-Wheels, European Commission, 2010, [consultado em Abril de 2010], Disponível na Internet: <http://ies.jrc.ec.europa.eu/WTW.html>.
78. EC, *CO₂ Capture and Storage*, European Commission, Directorate-General for Energy and Transport.
79. Zaporowski, B., *Analysis of energy-conversion processes in gas-steam power-plants integrated with coal gasification*, Applied Energy, 74(3-4): p. 297-304.
80. Lapuerta, M., Hernández, J.J., Pazo, A., López, J., *Gasification and co-gasification of biomass wastes: Effect of the biomass origin and the gasifier operating conditions*, Fuel Processing Technology, 89(9): p. 828-837, 2008.
81. U.S. EPA, Combined Heat and Power Partnership, U.S. Environmental Protection Agency, 2010, [consultado em Março de 2010], Disponível na Internet: <http://www.epa.gov/chp/basic/methods.html>.
82. Schwartz J., *Advanced Hydrogen Liquefaction Process*, Praxair Technology, Funding Opportunity Number: DE-PS36-07GO97009.
83. U.S. DOE, *Transportation Energy Data Book*, U.S. Department of Energy, Cap. 2, 2010.
84. EEA, *Road Transport*, European Environment Agency, Emission Inventory Guidebook, 2007.
85. Wallner, T., Lohse-Busch, H., Gurski, S., Douba, M., Thiel, W., Martin, D., Korn, T., *Fuel economy and emissions evaluation of BMW Hydrogen 7 Mono-Fuel demonstration vehicles*, International Journal of Hydrogen Energy, 33(24): p. 7607-7618, 2008.
86. Giunti, T., Delzanno, P., *State of Art for Automotive Fuel Cell in Northern Italy*, Fiat Group, Centro Ricerche Fiat, 2008.
87. Verhelst, S., Wallner, T., *Hydrogen-fueled internal combustion engines*, Progress in Energy and Combustion Science, 35(6): p. 490-527, 2009.
88. Green Car Congress, Quantum to Supply 4 Hydrogen Prius Hybrids to California ARB, Energy Technologies Issues and Policies for Sustainable

- Mobility, 2006, [consultado em Maio de 2010], Disponível na Internet: <http://www.greencarcongress.com>.
89. APFCT, ZES - Fuel Cell Scooter, Asia Pacific Fuel Cell Technologies Products Transportation, [consultado em Junho de 2010], Disponível na Internet: <http://www.apfct.com>.
90. Gruber, C., Wurster, R., *Hydrogen-fueled buses: The Bavarian fuel cell bus project*.
91. Galp Energia, Investidor, *Refinação & Distribuição*, 2010, [consultado em Junho de 2010], Disponível na Internet: <http://www.galpennergia.com>.
92. EC, *Portugal - Folha de dados de diversificação de energias*, European Commission, 2007.
93. DGEG, *Transporte de Gás Natural em Portugal*, Direcção Geral de Energia e Geologia, 2006.
94. Galp Energia, Investidor, *Pipelines internacionais*, 2010, [consultado em Junho de 2010], Disponível na Internet: <http://www.galpennergia.com>.
95. Galp Energia, Investidor, *A Galp Energia num relance*, 2010, [consultado em Junho de 2010], Disponível na Internet: <http://www.galpennergia.com>.
96. deiba, Adubos Deiba, *Comercialização de Adubos Lda.*, [consultado em Junho de 2010], Disponível na Internet: <http://www.adubosdeiba.com>.
97. FAOSAT, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010, [consultado em Junho de 2010], Disponível na Internet: <http://www.faosat.fao.org>.

Anexos

Quadro A 1 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de CO para veículos pesados de mercadorias com 0% de carga [82].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	5,07895	0,0505	5,90538	0,35284	1,2267
RT <=7.5t Euro-1	CO	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	2,63943	0,00191	-0,1337	0,0577	
RT <=7.5t Euro-2	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,28251	0,05962	-0,0004		
RT <=7.5t Euro-3	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	1,75313	0,0488	1,40627	0,22705	0,34513
RT <=7.5t Euro-4	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,02862	0,52805	-0,0108	0,48348	0,03642
RT <=7.5t Euro-5	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,02834	0,53402	-0,0007	0,48997	0,03549
RT >7,5-12t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	6,8864	0,05422	9,12835	0,20833	1,31276
RT >7,5-12t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	3,26462	0,05477	3,1376	0,22761	0,59083
RT >7,5-12t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	2,47276	0,06589	2,76986	0,28119	0,58818
RT >7,5-12t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	3,34221	0,05488	2,87353	0,19195	0,56273
RT >7,5-12t Euro	CO	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	0,4557	-0,0003	-0,0324	0,08358	
RT >7,5-12t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,04007	0,36338	3,84683	1,53537	0,01117
RT >12-14t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	7,1706	0,0552	10,426	0,19902	1,46874
RT >12-14t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	3,54284	0,0558	3,96132	0,22886	0,67178
RT >12-14t Euro	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,12107	0,03531	-0,0002		
RT >12-14t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	3,57796	0,05765	4,32114	0,19465	0,65083
RT >12-14t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,03332	0,38204	4,73828	1,98869	-0,0131
RT >12-14t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,03312	0,38988	4,74378	1,98872	-0,0132
RT >14-20t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	9,81719	0,05348	14,5535	0,17944	1,99129
RT >14-20t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	4,73026	0,05443	5,07901	0,18891	0,90816
RT >14-20t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	3,39124	0,06067	4,02589	0,22014	0,79598
RT >14-20t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	4,56864	0,05373	6,3848	0,17066	0,84305
RT >14-20t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,02941	0,60189	4,38449	1,86872	-0,0143
RT >14-20t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,02926	0,61455	4,37288	1,86496	-0,0143
RT >20-26t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	8,56888	0,05895	9,48991	0,22802	1,42704
RT >20-26t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	6,10475	0,05494	8,21634	0,22211	1,07452
RT >20-26t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	4,28116	0,06107	5,46936	0,25349	0,95537
RT >20-26t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	6,06374	0,05531	9,0625	0,19356	1,0146
RT >20-26t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,03516	0,79207	3,97207	1,74836	-0,0111
RT >20-26t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,03626	0,8069	3,94802	1,73719	-0,0104
RT >26-28t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	7,64914	0,05254	11,3585	0,22163	1,44694
RT >26-28t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	5,66317	0,05196	9,03523	0,22325	1,09749
RT >26-28t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	4,18646	0,05855	5,69614	0,26177	0,96648
RT >26-28t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	5,37492	0,04924	9,97344	0,18612	1,01956
RT >26-28t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	0,26382	0,03378	0,77672	0,14015	0,06497
RT >26-28t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	0,26899	0,03352	0,79387	0,14036	0,06507
RT >28-32t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	8,51605	0,05495	8,77159	0,26401	1,578
RT >28-32t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	6,25104	0,05378	6,41148	0,24564	1,20869
RT >28-32t Euro	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,09168	0,01827	-0,0001		
RT >28-32t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	6,24893	0,0535	5,82256	0,20571	1,14523
RT >28-32t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,04045	0,66993	4,0167	1,64275	-0,0086
RT >28-32t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,03942	0,68092	4,04984	1,65043	-0,0089
RT >32t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	9,38794	0,05874	12,8881	0,25577	1,60286
RT >32t Euro-1	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	6,5806	0,05422	9,83422	0,22486	1,21881
RT >32t Euro-2	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	4,61511	0,06021	6,69628	0,26458	1,1022
RT >32t Euro-3	CO	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x)$	6,88171	0,05603	9,81591	0,20158	1,16593
RT >32t Euro-4	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,04257	0,87357	3,90889	1,72435	-0,0101
RT >32t Euro-5	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,04587	0,89064	3,88159	1,71161	-0,0087

Quadro A 2 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de VOC para veículos pesados de mercadorias com 0% de carga [82].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7,5t 80ties	THC	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	3,03569	0,02849	4,55404	0,14723	0,34408
RT <=7,5t Euro-1	THC	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,64972	0,03936	0,61099	0,18774	0,12544
RT <=7,5t Euro-2	THC	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,41415	0,03804	0,44015	0,18554	0,07651
RT <=7,5t Euro-3	THC	$y=(1/(a+(b*(x^c))))$	1,2483	0,11465	1,03883		
RT <=7,5t Euro-4	THC	$y=(1/((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	21,0762	2,30198	0,00887		
RT <=7,5t Euro-5	THC	$y=(1/((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	20,8929	2,26648	0,00882		
RT >7,5-12t 80ties	THC	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,9638	0,02755	5,27117	0,12721	0,29753
RT >7,5-12t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,12673	1,9928	3,69961	1,52368	-0,002
RT >7,5-12t Euro	THC	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,58542	0,03826	0,93044	0,1248	0,12491
RT >7,5-12t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,05123	1,20898	4,06501	1,63748	-0,0065
RT >7,5-12t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,00294	0,07214	3,76397	1,55254	-0,0009
RT >7,5-12t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,00354	0,07405	3,64636	1,50572	0,00225
RT >12-14t 80ties	THC	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,99183	0,03077	6,32561	0,13024	0,42458
RT >12-14t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,12122	2,30821	3,88887	1,65952	-0,0089
RT >12-14t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,05207	1,59465	3,63577	1,59115	-0,0102
RT >12-14t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,07925	1,3534	4,48072	1,86966	-0,0107
RT >12-14t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,00298	0,07875	4,31421	1,83636	-0,0114
RT >12-14t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,00294	0,08035	4,32761	1,84209	-0,0119
RT >14-20t 80ties	THC	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	3,22508	0,0365	9,02434	0,13857	0,75357
RT >14-20t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,20228	3,41299	3,7188	1,61202	-0,006
RT >14-20t Euro	THC	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,01147	0,04351	1,77943	0,15314	0,21395
RT >14-20t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,10014	2,14541	3,99899	1,72254	-0,0088
RT >14-20t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,00323	0,12585	3,89855	1,71769	-0,0111
RT >14-20t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,00323	0,12853	3,88482	1,71369	-0,0112
RT >20-26t 80ties	THC	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,67866	0,03082	4,8589	0,12283	0,34364
RT >20-26t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,18236	5,0723	3,06832	1,44841	-0,0045
RT >20-26t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,10417	3,34384	2,87546	1,38764	-0,0038
RT >20-26t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,11115	3,04674	3,45368	1,58036	-0,0053
RT >20-26t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,00411	0,17133	3,49309	1,60665	-0,0071
RT >20-26t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,00419	0,17439	3,49088	1,60446	-0,007
RT >26-28t 80ties	THC	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,65924	0,02497	5,10885	0,1238	0,27824
RT >26-28t Euro	THC	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,45828	0,03131	4,10391	0,13475	0,33435
RT >26-28t Euro	THC	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,95943	0,03019	2,55942	0,13544	0,20122
RT >26-28t Euro	THC	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,8184	0,02544	2,81899	0,12906	0,14817
RT >26-28t Euro	THC	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,04835	0,02915	0,16147	0,13764	0,00806
RT >26-28t Euro	THC	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,04955	0,02927	0,16446	0,13806	0,00825
RT >28-32t 80ties	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,40058	8,83578	1,22852	0,8348	0,02123
RT >28-32t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,39006	6,18444	1,57636	0,9135	0,02066
RT >28-32t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,23289	3,65289	1,80793	0,96805	0,01737
RT >28-32t Euro	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,05327	2,68125	3,50254	1,49183	-0,0081
RT >28-32t Euro	THC	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,06269	0,04	0,10826	0,13515	0,01131
RT >28-32t Euro	THC	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,0644	0,04018	0,10969	0,13509	0,01162
RT >32t 80ties	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,23392	7,06359	2,93541	1,39362	-0,0006
RT >32t Euro-1	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,17269	5,77763	3,03406	1,44228	-0,0054
RT >32t Euro-2	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,09179	3,77586	2,84239	1,37855	-0,0049
RT >32t Euro-3	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,11442	3,36936	3,48362	1,58737	-0,0059
RT >32t Euro-4	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,00606	0,18846	3,44543	1,58057	-0,0036
RT >32t Euro-5	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,00619	0,19158	3,45924	1,58312	-0,0037

Quadro A 3 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de NO_x para veículos pesados de mercadorias com 0% de carga [82].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,31327	-0,0231	6,70588	0,06688	2,70589
RT <=7.5t Euro-1	NO _x	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	8,16597	0,02716	-0,4538	0,06911	
RT <=7.5t Euro-2	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,44038	-0,0161	6,94773	0,08294	1,85299
RT <=7.5t Euro-3	NO _x	$y=((a*(b^x))*(x^c))$	40,4812	1,01902	-0,9828		
RT <=7.5t Euro-4	NO _x	$y=((a*(b^x))*(x^c))$	17,3497	1,01969	-0,8989		
RT <=7.5t Euro-5	NO _x	$y=((a*(b^x))*(x^c))$	13,8773	1,02107	-0,9968		
RT >7,5-12t 80ties	NO _x	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	20,4177	0,04627	-0,9784	0,06154	
RT >7,5-12t Euro	NO _x	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	14,3564	0,02141	-0,8568	0,07365	
RT >7,5-12t Euro	NO _x	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	15,8946	0,01587	-0,9857	0,07966	
RT >7,5-12t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	11,9674	0,09591	32,0018	0,41519	3,29935
RT >7,5-12t Euro	NO _x	$y=((a*(b^x))*(x^c))$	26,3037	1,01497	-0,8441		
RT >7,5-12t Euro	NO _x	$y=((a*(b^x))*(x^c))$	20,3406	1,01629	-0,9306		
RT >12-14t 80ties	NO _x	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	24,0658	0,03565	-1,2165	0,06516	
RT >12-14t Euro	NO _x	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	16,4689	0,01487	-0,9857	0,07647	
RT >12-14t Euro	NO _x	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	18,383	0,00812	-1,1512	0,08104	
RT >12-14t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	9,80994	0,07081	33,3337	-0,33879	3,49563
RT >12-14t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	6,17224	0,0824	43,284	0,58405	2,15636
RT >12-14t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	3,58959	0,07765	19,3887	0,45944	1,266
RT >14-20t 80ties	NO _x	$y=(1/((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0,02254	0,00291	-2E-05		
RT >14-20t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	16,2043	0,07965	33,2222	0,49571	5,11254
RT >14-20t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	16,0165	0,07298	29,1865	0,38627	5,45992
RT >14-20t Euro	NO _x	$y=(a+(b*(1+\exp(((c-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	3,91192	320,177	-1,1798	0,90231	0,02485
RT >14-20t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	7,2094	0,06739	30,9544	0,40283	2,49333
RT >14-20t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	4,3467	0,06496	20,2862	0,37018	1,46306
RT >20-26t 80ties	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	23,1192	0,06659	52,5959	0,43526	8,21215
RT >20-26t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	16,3563	0,06764	60,5322	0,46978	5,88266
RT >20-26t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	16,9851	0,06386	41,9028	0,37147	6,28129
RT >20-26t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	14,0807	0,05982	46,3436	0,29624	4,89189
RT >20-26t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	7,75702	0,06164	35,3057	0,39462	2,92091
RT >20-26t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	4,74967	0,06102	23,7085	0,37709	1,72448
RT >26-28t 80ties	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	22,4266	0,06405	60,3414	0,46237	8,55374
RT >26-28t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	16,0983	0,06397	61,805	0,47723	6,09781
RT >26-28t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	17,1405	0,06211	43,8877	0,39072	6,45553
RT >26-28t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	15,4387	0,06269	48,613	0,31791	4,91261
RT >26-28t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	8,26754	0,0626	41,5792	0,44087	2,97708
RT >26-28t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	5,20452	0,06336	27,9063	0,42219	1,74867
RT >28-32t 80ties	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	20,9009	0,06465	2003,56	1,10464	9,72859
RT >28-32t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	16,4695	0,06578	89,1268	0,54964	7,04736
RT >28-32t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	17,3641	0,06258	66,8659	0,47938	7,41207
RT >28-32t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	13,0259	0,05391	41,9952	0,24574	5,48505
RT >28-32t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	7,898	0,05981	29,2828	0,34968	3,4185
RT >28-32t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	4,6655	0,05729	17,3233	0,29059	1,99386
RT >32t 80ties	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	23,2768	0,06311	148,04	0,59709	9,22383
RT >32t Euro-1	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	17,205	0,0638	63,6241	0,44799	6,71571
RT >32t Euro-2	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	17,9507	0,06035	44,5834	0,35754	7,12354
RT >32t Euro-3	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	14,8143	0,05725	48,2183	0,28109	5,5666
RT >32t Euro-4	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	8,0949	0,05825	36,1582	0,37606	3,3388
RT >32t Euro-5	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	4,91642	0,05753	23,8518	0,35486	1,97296

Quadro A 4 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de PM para veículos pesados de mercadorias com 0% de carga [82].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7,5t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,91703	0,05362	1,2436	0,24443	0,22957
RT <=7,5t Euro-1	PM	$y=(a+(b*(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,08914	3,64462	-1,4533	0,268	0,05242
RT <=7,5t Euro-2	PM	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	5,84008	0,47161	-0,004		
RT <=7,5t Euro-3	PM	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	0,21102	-0,0001	-0,0094	0,05746	
RT <=7,5t Euro-4	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,02547	0,0377	0,07225	0,16732	0,00573
RT <=7,5t Euro-5	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,02571	0,03753	0,07306	0,16698	0,00574
RT >7,5-12t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,98164	0,05178	1,54093	0,18733	0,21104
RT >7,5-12t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,75654	0,06137	0,52561	0,16212	0,12886
RT >7,5-12t Euro	PM	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	0,2847	0,00065	-0,0135	0,05414	
RT >7,5-12t Euro	PM	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	0,50035	-0,0002	-0,0312	0,07315	
RT >7,5-12t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,04845	0,0475	0,12857	0,16575	0,00995
RT >7,5-12t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,05079	0,04831	0,13079	0,16793	0,01014
RT >12-14t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,0154	0,05288	1,77668	0,18948	0,23469
RT >12-14t Euro	PM	$y=(a+(b*(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,00948	1,17162	4,59514	1,93301	-0,0234
RT >12-14t Euro	PM	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	2,17307	0,34439	-0,0028		
RT >12-14t Euro	PM	$y=(a+(b*(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,04048	0,41702	5,93416	2,3778	-0,023
RT >12-14t Euro	PM	$y=(a+(b*(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,00716	0,14308	3,62619	1,74328	-0,0086
RT >12-14t Euro	PM	$y=(a+(b*(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,00716	0,14551	3,64316	1,74828	-0,0088
RT >14-20t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,34656	0,05015	2,54908	0,17035	0,31044
RT >14-20t Euro	PM	$y=(a+(b*(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,08529	1,63035	4,91961	2,06182	-0,018
RT >14-20t Euro	PM	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	1,29841	0,28167	-0,0021		
RT >14-20t Euro	PM	$y=(a+(b*(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,06007	0,65147	5,54523	2,24659	-0,0164
RT >14-20t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,07045	0,04581	0,21503	0,1708	0,01446
RT >14-20t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,07159	0,04567	0,21963	0,17089	0,01459
RT >20-26t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,50002	0,05648	1,74563	0,19873	0,3073
RT >20-26t Euro	PM	$y=(a+(b*(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,00214	2,80412	3,71362	1,71058	-0,0164
RT >20-26t Euro	PM	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	0,55123	0,00052	-0,0289	0,06077	
RT >20-26t Euro	PM	$y=(a+(b*(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,05935	0,93355	4,72775	1,97253	-0,0111
RT >20-26t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,09352	0,04696	0,24085	0,17055	0,01669
RT >20-26t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,09521	0,04681	0,24543	0,17057	0,01682
RT >26-28t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,30583	0,0488	2,08732	0,19138	0,3092
RT >26-28t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,95694	0,0426	2,68929	0,16453	0,19738
RT >26-28t Euro	PM	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	1,29096	0,19061	-0,0012		
RT >26-28t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,26707	0,02464	1,06112	0,12302	0,06837
RT >26-28t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,07875	0,03998	0,26614	0,16548	0,01617
RT >26-28t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,08042	0,03996	0,27168	0,16588	0,01633
RT >28-32t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,49009	0,05208	1,68268	0,22511	0,34556
RT >28-32t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,24869	0,05118	2,00146	0,18504	0,23535
RT >28-32t Euro	PM	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	1,50427	0,16509	-0,0011		
RT >28-32t Euro	PM	$y=(a+(b*(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,05779	0,77752	4,54648	1,79844	-0,011
RT >28-32t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,08615	0,04178	0,27402	0,16982	0,01824
RT >28-32t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,08816	0,04184	0,27872	0,16958	0,01849
RT >32t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,68921	0,05646	2,40719	0,22614	0,34562
RT >32t Euro-1	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,37294	0,0521	2,65221	0,17883	0,22767
RT >32t Euro-2	PM	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	0,60017	0,00071	-0,0297	0,05727	
RT >32t Euro-3	PM	$y=(a+(b*(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0,06177	1,0299	4,65034	1,93806	-0,0115
RT >32t Euro-4	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,10181	0,04623	0,26779	0,16998	0,01861
RT >32t Euro-5	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,10338	0,046	0,27308	0,16931	0,01877

Quadro A 5 – Fórmulas para cálculo do consumo de combustível para veículos pesados de mercadorias com 0% de carga [82].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	FC	$y=((a*(x^b)))+(c*(x^d))$	0,00024	2,73653	676,067	-0,4997	
RT <=7.5t Euro-1	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,39847	-0,0509	195,75	0,08151	78,0794
RT <=7.5t Euro-2	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,70709	-0,0448	169,398	0,07961	72,6177
RT <=7.5t Euro-3	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,01459	-0,0412	187,457	0,07727	75,3424
RT <=7.5t Euro-4	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,65428	-0,0444	190,756	0,08176	73,0598
RT <=7.5t Euro-5	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,59829	-0,0453	196,341	0,08187	74,4052
RT >7.5-12t 80ties	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,00114	0,00019	-1E-06		
RT >7.5-12t Euro	FC	$y=((a*(x^b)))+(c*(x^d))$	9,5E-05	2,99461	963,465	-0,5511	
RT >7.5-12t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,00181	0,00024	-2E-06		
RT >7.5-12t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,00157	0,00023	-2E-06		
RT >7.5-12t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,00157	0,00024	-2E-06		
RT >7.5-12t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,0015	0,00024	-2E-06		
RT >12-14t 80ties	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,0009	0,00018	-1E-06		
RT >12-14t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,00124	0,00022	-2E-06		
RT >12-14t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,00149	0,00022	-2E-06		
RT >12-14t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,00127	0,00021	-2E-06		
RT >12-14t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,0013	0,00023	-2E-06		
RT >12-14t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,00125	0,00022	-2E-06		
RT >14-20t 80ties	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,00058	0,00014	-1E-06		
RT >14-20t Euro	FC	$y=((a*(x^b)))+(c*(x^d))$	0,00012	2,93531	1720,38	-0,6302	
RT >14-20t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,00097	0,00018	-1E-06		
RT >14-20t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,0008	0,00017	-1E-06		
RT >14-20t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,00082	0,00019	-1E-06		
RT >14-20t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,00078	0,00018	-1E-06		
RT >20-26t 80ties	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	740,23	0,06512	4881,34	0,5663	195,824
RT >20-26t Euro	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	569,115	0,0654	16111,8	0,818	165,909
RT >20-26t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,00092	0,00014	-1E-06		
RT >20-26t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,00077	0,00014	-9E-07		
RT >20-26t Euro	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	517,625	0,06375	2785,13	0,52478	155,315
RT >20-26t Euro	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	530,707	0,06339	2704,53	0,51186	157,588
RT >26-28t 80ties	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	701,12	0,06101	4934,45	0,5557	205,272
RT >26-28t Euro	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	536,314	0,06086	13293,3	0,76727	174,178
RT >26-28t Euro	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	470,238	0,05977	11125,4	0,76524	168,284
RT >26-28t Euro	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	504,972	0,05822	1754,76	0,43175	173,078
RT >26-28t Euro	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	482,887	0,05893	2406,69	0,48319	162,265
RT >26-28t Euro	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	494,902	0,05851	2363,01	0,47114	164,543
RT >28-32t 80ties	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,00078	9,2E-05	-6E-07		
RT >28-32t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,00095	0,00011	-8E-07		
RT >28-32t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,00113	0,00011	-8E-07		
RT >28-32t Euro	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,001	0,00011	-7E-07		
RT >28-32t Euro	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	489,318	0,06056	10612,1	0,78005	186,747
RT >28-32t Euro	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	502,355	0,06005	8992,98	0,74323	189,488
RT >32t 80ties	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	753,53	0,06236	10477,2	0,69442	218,344
RT >32t Euro-1	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	606,817	0,06267	15645,7	0,78659	187,437
RT >32t Euro-2	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,00088	0,00012	-8E-07		
RT >32t Euro-3	FC	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,00075	0,00012	-8E-07		
RT >32t Euro-4	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	544,051	0,06072	3022,9	0,51681	174,447
RT >32t Euro-5	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	558,076	0,06036	2946,19	0,50365	176,943

Quadro A 6 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de CO para veículos pesados de mercadorias com 50% de carga [82].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <= 7.5t 80ties	CO	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1)^c * d * \ln(x)) + (e * x))))))$	1,331007267	21,845	-0,505	0,3128217	0,04756
RT <= 7.5t Euro-1	CO	$y = ((a + (b * x)) + (((c - b) * (1 - \exp(((-1)^d * x))) / d))$	2,762608227	0,00422	-0,1388	0,0554389	
RT <= 7.5t Euro-2	CO	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,251138399	0,05609	-0,0004		
RT <= 7.5t Euro-3	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	1,848048637	0,05096	1,93686	0,2697384	0,38418
RT <= 7.5t Euro-4	CO	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1)^c * d * \ln(x)) + (e * x))))))$	0,031240863	0,57335	-0,0393	0,4988833	0,0384
RT <= 7.5t Euro-5	CO	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1)^c * d * \ln(x)) + (e * x))))))$	0,031000113	0,56606	0,0033	0,5071256	0,03752
RT > 7,5-12t 80ties	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	7,476983188	0,05866	10,5658	0,2455278	1,49597
RT > 7,5-12t Euro	CO	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1)^c * d * \ln(x)) + (e * x))))))$	0,709894073	48,0006	-1,6843	0,3733619	0,04759
RT > 7,5-12t Euro	CO	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,134471625	0,03394	-0,0002		
RT > 7,5-12t Euro	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	3,589775856	0,05639	3,83629	0,2423465	0,63569
RT > 7,5-12t Euro	CO	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1)^c * d * \ln(x)) + (e * x))))))$	0,039322261	0,38014	3,78075	1,5795827	0,00423
RT > 7,5-12t Euro	CO	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1)^c * d * \ln(x)) + (e * x))))))$	0,041175668	0,38981	3,65981	1,526029	0,00752
RT > 12-14t 80ties	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	7,537075258	0,05691	11,8122	0,2276825	1,6408
RT > 12-14t Euro	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	3,611931597	0,0569	5,46378	0,2737815	0,79032
RT > 12-14t Euro	CO	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,133525099	0,03011	-0,0002		
RT > 12-14t Euro	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	3,664578531	0,05637	5,23029	0,2294067	0,73169
RT > 12-14t Euro	CO	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1)^c * d * \ln(x)) + (e * x))))))$	0,035959181	0,4141	3,95028	1,7284427	-0,0081
RT > 12-14t Euro	CO	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1)^c * d * \ln(x)) + (e * x))))))$	0,036137448	0,42082	3,97191	1,7345749	-0,0082
RT > 14-20t 80ties	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	10,65592222	0,05571	17,3777	0,2196783	2,12159
RT > 14-20t Euro	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	4,985290563	0,05579	7,55125	0,2516974	1,00263
RT > 14-20t Euro	CO	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,08694066	0,02341	-0,0001		
RT > 14-20t Euro	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	5,148456463	0,05646	6,88089	0,2111557	0,95765
RT > 14-20t Euro	CO	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1)^c * d * \ln(x)) + (e * x))))))$	0,043321527	0,61727	3,94062	1,724114	-0,008
RT > 14-20t Euro	CO	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1)^c * d * \ln(x)) + (e * x))))))$	0,041379916	0,62307	4,02779	1,7532224	-0,0095
RT > 20-26t 80ties	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	8,636838345	0,05844	14,19	0,2779354	1,59755
RT > 20-26t Euro	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	6,023257241	0,05386	13,072	0,2733165	1,26708
RT > 20-26t Euro	CO	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,074600778	0,01815	-0,0001		
RT > 20-26t Euro	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	6,675657237	0,05741	10,9768	0,2478646	1,22359
RT > 20-26t Euro	CO	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1)^c * d * \ln(x)) + (e * x))))))$	0,051787253	0,79559	3,60568	1,6282649	-0,0067
RT > 20-26t Euro	CO	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1)^c * d * \ln(x)) + (e * x))))))$	0,051528029	0,80977	3,61686	1,6317085	-0,0068
RT > 26-28t 80ties	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	8,134118834	0,05421	15,8644	0,2753205	1,6431
RT > 26-28t Euro	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	5,735352711	0,05148	13,7292	0,2770043	1,3437
RT > 26-28t Euro	CO	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,077921721	0,01741	-0,0001		
RT > 26-28t Euro	CO	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1)^c * d * \ln(x)) + (e * x))))))$	1,245883584	103,701	-1,3906	0,5434518	0,03901
RT > 26-28t Euro	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	0,265667112	0,03436	0,75271	0,1459044	0,07453
RT > 26-28t Euro	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	0,270049299	0,03419	0,76972	0,1457958	0,07469
RT > 28-32t 80ties	CO	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1)^c * d * \ln(x)) + (e * x))))))$	1,751127164	72,0217	-0,9773	0,4358463	0,04036
RT > 28-32t Euro	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	6,13895076	0,05084	15,2922	0,3360729	1,547
RT > 28-32t Euro	CO	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,084180871	0,01433	-9E-05		
RT > 28-32t Euro	CO	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1)^c * d * \ln(x)) + (e * x))))))$	1,412765399	69,1648	-1,3697	0,347118	0,04601
RT > 28-32t Euro	CO	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1)^c * d * \ln(x)) + (e * x))))))$	0,055754738	0,7425	3,34929	1,4384895	-0,003
RT > 28-32t Euro	CO	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1)^c * d * \ln(x)) + (e * x))))))$	0,056675727	0,74836	3,3875	1,448786	-0,0031
RT > 32t 80ties	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	9,648937019	0,05755	19,6156	0,3096687	1,86986
RT > 32t Euro-1	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	6,644875473	0,05192	16,4253	0,2909037	1,56108
RT > 32t Euro-2	CO	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,069949582	0,01478	-1E-04		
RT > 32t Euro-3	CO	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1)^c * d * \ln(x)) + (e * x))))))$	1,465666998	64,6249	-0,7873	0,5178107	0,04277
RT > 32t Euro-4	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	0,392265481	0,04621	0,69537	0,1656874	0,0941
RT > 32t Euro-5	CO	$y = ((a + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	0,398609082	0,04596	0,71449	0,1655906	0,09451

Quadro A 7 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de VOC para veículos pesados de mercadorias com 50% de carga [82].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	THC	$y = (1 / ((c * (x^2)) + (b * x)) + a)$	0,11191229	0,01586	2,6E-05		
RT <=7.5t Euro-1	THC	$y = ((a + (a * \exp((-1) * b * x))) + (c * \exp((-1) * d * x)))$	0,655681829	0,04141	0,5799	0,1798819	0,13036
RT <=7.5t Euro-2	THC	$y = ((a + (a * \exp((-1) * b * x))) + (c * \exp((-1) * d * x)))$	0,408108803	0,03907	0,41562	0,1701774	0,07849
RT <=7.5t Euro-3	THC	$y = \exp((a + (b * x)) + (c * \ln(x)))$	1,617969791	-3,956	-0,9286		
RT <=7.5t Euro-4	THC	$y = (1 / ((c * (x^2)) + (b * x)) + a)$	20,14111884	2,49039	0,00763		
RT <=7.5t Euro-5	THC	$y = (1 / ((c * (x^2)) + (b * x)) + a)$	19,96931791	2,45266	0,0076		
RT >7,5-12t 80ties	THC	$y = ((a + (a * \exp((-1) * b * x))) + (c * \exp((-1) * d * x)))$	2,050217388	0,03302	5,18612	0,129912	0,35351
RT >7,5-12t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,165814916	1,91236	3,80261	1,5382812	0,00347
RT >7,5-12t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,108682277	1,35815	3,23091	1,3559732	0,00903
RT >7,5-12t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,087634986	1,15561	4,03415	1,6117658	0,00185
RT >7,5-12t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,004256574	0,07125	3,59781	1,484271	0,00742
RT >7,5-12t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,004573121	0,07398	3,44238	1,426175	0,0101
RT >12-14t 80ties	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,243760788	7,10826	3,51237	1,609276	-0,0067
RT >12-14t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,178064013	2,23782	3,89161	1,6498336	-0,0026
RT >12-14t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,124965177	1,62341	3,17356	1,4162658	0,00676
RT >12-14t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,083736033	1,32104	4,53135	1,8934873	-0,0104
RT >12-14t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,002967847	0,07675	4,43356	1,8897666	-0,0126
RT >12-14t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,002950649	0,07819	4,44761	1,8942502	-0,013
RT >14-20t 80ties	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,445045383	10,3743	3,47843	1,6020816	-0,005
RT >14-20t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,204570948	3,41239	3,73786	1,6219017	-0,0055
RT >14-20t Euro	THC	$y = ((a + (a * \exp((-1) * b * x))) + (c * \exp((-1) * d * x)))$	0,938046534	0,04167	1,83848	0,1446644	0,20511
RT >14-20t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,101638837	2,05915	4,20389	1,7977908	-0,0102
RT >14-20t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,003222203	0,12024	4,14338	1,8096038	-0,0131
RT >14-20t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,003082806	0,12247	4,14849	1,8106704	-0,0135
RT >20-26t 80ties	THC	$y = ((a + (a * \exp((-1) * b * x))) + (c * \exp((-1) * d * x)))$	1,561301739	0,03024	5,11689	0,1227295	0,30866
RT >20-26t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,186871672	4,97887	3,15416	1,4722586	-0,0043
RT >20-26t Euro	THC	$y = ((a + (a * \exp((-1) * b * x))) + (c * \exp((-1) * d * x)))$	0,818490372	0,02884	2,58536	0,1225967	0,1881
RT >20-26t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,121488681	2,91411	3,5694	1,6195267	-0,0048
RT >20-26t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,00453156	0,16182	3,71452	1,6882421	-0,008
RT >20-26t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,00479675	0,16504	3,69837	1,6815444	-0,0075
RT >26-28t 80ties	THC	$y = ((a + (a * \exp((-1) * b * x))) + (c * \exp((-1) * d * x)))$	1,531679942	0,02452	5,36992	0,1240068	0,24634
RT >26-28t Euro	THC	$y = ((a + (a * \exp((-1) * b * x))) + (c * \exp((-1) * d * x)))$	1,369133419	0,03008	4,16528	0,1308148	0,32133
RT >26-28t Euro	THC	$y = ((a + (a * \exp((-1) * b * x))) + (c * \exp((-1) * d * x)))$	0,82800979	0,02481	2,67001	0,1248829	0,16291
RT >26-28t Euro	THC	$y = ((a + (a * \exp((-1) * b * x))) + (c * \exp((-1) * d * x)))$	0,715880748	0,02347	2,79878	0,1234598	0,13594
RT >26-28t Euro	THC	$y = ((a + (a * \exp((-1) * b * x))) + (c * \exp((-1) * d * x)))$	0,047332518	0,03283	0,15821	0,139438	0,00885
RT >26-28t Euro	THC	$y = ((a + (a * \exp((-1) * b * x))) + (c * \exp((-1) * d * x)))$	0,048568395	0,03298	0,16126	0,1399317	0,00905
RT >28-32t 80ties	THC	$y = ((a + (a * \exp((-1) * b * x))) + (c * \exp((-1) * d * x)))$	2,206595337	0,03868	4,09862	0,137648	0,39389
RT >28-32t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,342428022	4,82997	2,55422	1,1950602	0,01039
RT >28-32t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,12325609	2,99558	2,92821	1,3278666	-0,0015
RT >28-32t Euro	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,116548595	2,51652	3,60443	1,5381579	-0,0048
RT >28-32t Euro	THC	$y = ((a + (a * \exp((-1) * b * x))) + (c * \exp((-1) * d * x)))$	0,063201466	0,04343	0,1079	0,1420279	0,01125
RT >28-32t Euro	THC	$y = ((a + (a * \exp((-1) * b * x))) + (c * \exp((-1) * d * x)))$	0,065194189	0,04366	0,10942	0,1425262	0,01152
RT >32t 80ties	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,166741218	7,07255	3,11503	1,4839578	-0,0042
RT >32t Euro-1	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,205228623	5,70159	3,04378	1,4408028	-0,0037
RT >32t Euro-2	THC	$y = ((a + (a * \exp((-1) * b * x))) + (c * \exp((-1) * d * x)))$	0,892970186	0,02705	2,90373	0,1219375	0,19423
RT >32t Euro-3	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,117502782	3,23588	3,53367	1,6097921	-0,0061
RT >32t Euro-4	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,004949973	0,17955	3,65568	1,672056	-0,0076
RT >32t Euro-5	THC	$y = (a + (b / (1 + \exp(((-1) * c) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0,005359925	0,18334	3,64831	1,6689269	-0,007

Quadro A 8 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de NO_x para veículos pesados de mercadorias com 50% de carga [82].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	NO _x	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	9,468632772	0,0443	-0,327	0,0444311	
RT <=7.5t Euro-1	NO _x	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	8,131803541	0,02422	-0,4072	0,0658736	
RT <=7.5t Euro-2	NO _x	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	8,952916843	0,0195	-0,4607	0,0688711	
RT <=7.5t Euro-3	NO _x	$y=((a*(x^b))+(c*(x^d)))$	0,007370392	1,21572	31,1926	-0,770236	
RT <=7.5t Euro-4	NO _x	$y=((a*(x^b))*(x^c))$	15,28321578	1,01661	-0,8039		
RT <=7.5t Euro-5	NO _x	$y=((a*(x^b))*(x^c))$	12,22728665	1,01808	-0,9035		
RT >7.5-12t 80ties	NO _x	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	20,38627574	0,0399	-0,8202	0,0549328	
RT >7.5-12t Euro	NO _x	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	14,09512728	0,01438	-0,7275	0,0707128	
RT >7.5-12t Euro	NO _x	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	15,66328192	0,00906	-0,8539	0,0747953	
RT >7.5-12t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	9,445678225	0,07774	29,691	0,3539661	3,5665
RT >7.5-12t Euro	NO _x	$y=((a*(x^b))*(x^c))$	21,92758623	1,01107	-0,7141		
RT >7.5-12t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	3,440993649	0,08476	20,4435	0,4993579	1,32613
RT >12-14t 80ties	NO _x	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	23,96352103	0,02477	-1,0104	0,0586067	
RT >12-14t Euro	NO _x	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	16,14980498	0,00592	-0,8254	0,0711531	
RT >12-14t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	12,01627632	0,07187	1472,97	1,2228117	5,03805
RT >12-14t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	8,839918673	0,05821	32,8119	0,3246556	3,75961
RT >12-14t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	5,26904752	0,06495	41,2442	0,5456369	2,39225
RT >12-14t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	3,095614495	0,06121	19,9267	0,4440804	1,3948
RT >14-20t 80ties	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	22,00346113	0,06262	60,7552	0,5674418	9,56284
RT >14-20t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	14,0156843	0,06408	57,135	0,5426382	5,68547
RT >14-20t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	14,67839938	0,06019	36,2684	0,4174634	5,93888
RT >14-20t Euro	NO _x	$y=((a*(x^b))*(x^c))$	78,96459415	1,00751	-0,7841		
RT >14-20t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	6,70093565	0,05572	33,8551	0,4144631	2,78059
RT >14-20t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	4,053639943	0,05396	21,2354	0,3742901	1,62695
RT >20-26t 80ties	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	20,50277185	0,04892	70,711	0,4696047	9,4897
RT >20-26t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	14,67988792	0,0501	96,6622	0,5445608	6,71862
RT >20-26t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	16,19957685	0,04965	53,9017	0,426027	7,00624
RT >20-26t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	13,83097156	0,04967	45,2534	0,2996162	5,50025
RT >20-26t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	7,581157613	0,04874	44,2456	0,4422265	3,39253
RT >20-26t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	4,645473547	0,04899	27,4547	0,4092217	2,00405
RT >26-28t 80ties	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	20,11845202	0,04617	94,2835	0,5378817	9,89341
RT >26-28t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	14,76494302	0,04714	93,3693	0,5507392	6,93778
RT >26-28t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	16,40013568	0,04782	55,7003	0,4446735	7,20537
RT >26-28t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	14,57249962	0,05104	45,6519	0,3092401	5,58301
RT >26-28t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	7,880339249	0,04837	53,3788	0,485456	3,47072
RT >26-28t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	4,946527157	0,04984	32,5113	0,4492059	2,04096
RT >28-32t 80ties	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	18,30891173	0,04044	282,954	0,8038698	11,2495
RT >28-32t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	14,73772506	0,04399	219,819	0,6931457	8,03342
RT >28-32t Euro	NO _x	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	30,68896555	-0,0381	-1,467	0,0747006	
RT >28-32t Euro	NO _x	$y=((a*(x^b))*(x^c))$	82,27058003	1,00501	-0,6651		
RT >28-32t Euro	NO _x	$y=((a*(x^b))*(x^c))$	32,99505658	1,00276	-0,5221		
RT >28-32t Euro	NO _x	$y=(1/(a+(b*(x^c))))$	-0,221447546	0,214	0,24853		
RT >32t 80ties	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	21,21694955	0,03982	346,82	0,7410774	10,8629
RT >32t Euro-1	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	15,73609825	0,04159	112,895	0,5556916	7,75728
RT >32t Euro-2	NO _x	$y=(a+(b*(1+\exp(((c-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	7,350238493	214,628	-1,4099	0,457996	0,02224
RT >32t Euro-3	NO _x	$y=((a*(x^b))*(x^c))$	78,78815667	1,00396	-0,6328		
RT >32t Euro-4	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	8,34487524	0,04237	55,4712	0,4654128	3,95866
RT >32t Euro-5	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	5,15201122	0,04314	32,2626	0,422801	2,33204

Quadro A 9 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de PM para veículos pesados de mercadorias com 50% de carga [82].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,98445	0,05739	1,3575285	0,2675	0,24668
RT <=7.5t Euro-1	PM	$y=(a/(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,09642	3,4378	-1,419391	0,24971	0,05487
RT <=7.5t Euro-2	PM	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x)))+(a))$	5,35203	0,43012	-0,003546		
RT <=7.5t Euro-3	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,13963	0,04368	0,0425858	0,13884	0,03679
RT <=7.5t Euro-4	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,0261	0,03907	0,0723451	0,16834	0,00594
RT <=7.5t Euro-5	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,02637	0,03894	0,0730533	0,16799	0,00596
RT >7.5-12t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,13577	0,05691	1,774217	0,23427	0,23576
RT >7.5-12t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,80556	0,06327	0,566807	0,21039	0,14279
RT >7.5-12t Euro	PM	$y=((a+(b*x)))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	0,28766	0,00139	-0,010701	0,03718	
RT >7.5-12t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,3062	0,05639	0,1420784	0,12602	0,06099
RT >7.5-12t Euro	PM	$y=(a/(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,00422	0,15204	3,1902798	1,6079	-0,0101
RT >7.5-12t Euro	PM	$y=(a/(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,00401	0,15498	3,2040837	1,61172	-0,0106
RT >12-14t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,12883	0,05529	2,0727212	0,23151	0,25746
RT >12-14t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,75056	0,05956	0,7847505	0,19012	0,15621
RT >12-14t Euro	PM	$y=((a+(b*x)))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	0,29584	0,00221	-0,009872	0,02931	
RT >12-14t Euro	PM	$y=(a/(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,00753	0,48178	4,5774146	1,88064	-0,0224
RT >12-14t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,0449	0,04294	0,1405163	0,16423	0,01084
RT >12-14t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,04573	0,04299	0,1430869	0,16398	0,01097
RT >14-20t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,53191	0,05278	2,8920911	0,20794	0,32964
RT >14-20t Euro	PM	$y=(a/(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,08591	1,69826	4,4015769	1,89117	-0,0163
RT >14-20t Euro	PM	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x)))+(a))$	1,49932	0,22171	-0,001617		
RT >14-20t Euro	PM	$y=(a/(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,04084	0,67112	4,9484664	2,03451	-0,0188
RT >14-20t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,06761	0,04368	0,2114309	0,16777	0,01458
RT >14-20t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,06895	0,04376	0,2148245	0,16766	0,01475
RT >20-26t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,50777	0,05366	2,1996304	0,23917	0,3472
RT >20-26t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,32375	0,05359	2,5394632	0,21281	0,23447
RT >20-26t Euro	PM	$y=((a+(b*x)))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	0,52883	0,00354	-0,017986	0,02954	
RT >20-26t Euro	PM	$y=(a/(b/(1+\exp(((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	-0,008	1,08042	3,6817374	1,62126	-0,0167
RT >20-26t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,09418	0,04668	0,2337904	0,17345	0,01756
RT >20-26t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,09476	0,04625	0,238333	0,17204	0,01768
RT >26-28t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,43156	0,04901	2,5973197	0,24736	0,35539
RT >26-28t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,19643	0,04966	2,7976392	0,2111	0,24625
RT >26-28t Euro	PM	$y=((a+(b*x)))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	0,52247	0,00449	-0,016281	0,02492	
RT >26-28t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,42445	0,04164	0,864328	0,15995	0,10082
RT >26-28t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,08035	0,04039	0,2567803	0,16703	0,01699
RT >26-28t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,0818	0,04029	0,2625674	0,16738	0,01715
RT >28-32t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,52281	0,04778	2,7254459	0,29569	0,39238
RT >28-32t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,33066	0,05147	2,562516	0,24955	0,28399
RT >28-32t Euro	PM	$y=((a*(x^2)))+(b*x)))+(c)$	9E-05	-0,0111	0,5034456		
RT >28-32t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,53572	0,04894	0,4039991	0,1771	0,11918
RT >28-32t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,08604	0,04025	0,2723259	0,1702	0,01849
RT >28-32t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,08774	0,04029	0,2773739	0,17005	0,01878
RT >32t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,70276	0,05206	3,3034496	0,2811	0,40597
RT >32t Euro-1	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,49111	0,05235	3,0547266	0,23479	0,28408
RT >32t Euro-2	PM	$y=((a+(b*x)))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d)$	0,58827	0,01331	-0,015953	0,01295	
RT >32t Euro-3	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,58941	0,05018	0,8253222	0,18235	0,11801
RT >32t Euro-4	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,10723	0,04656	0,2598185	0,17946	0,01967
RT >32t Euro-5	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,10895	0,04643	0,2663945	0,17947	0,01989

Quadro A 10 – Fórmulas para cálculo do consumo de combustível para veículos pesados de mercadorias com 50% de carga [82].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,00231	0,00023	-0,000002		
RT <=7.5t Euro-1	FC	$y = ((a * (x^b)) + (c * (x^d)))$	0,00030	2,68877	465,253	-0,4399	
RT <=7.5t Euro-2	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	0,69127	-0,04430	160,750	0,0711	79,292
RT <=7.5t Euro-3	FC	$y = ((a * (x^b)) + (c * (x^d)))$	0,00052	2,55885	437,509	-0,4216	
RT <=7.5t Euro-4	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	0,44418	-0,04752	179,623	0,0753	80,775
RT <=7.5t Euro-5	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	0,40527	-0,04843	184,930	0,0754	82,132
RT >7,5-12t 80ties	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,00122	0,00016	-0,000001		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,00167	0,00018	-0,000001		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,00196	0,00018	-0,000002		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,00175	0,00018	-0,000001		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,00177	0,00019	-0,000002		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,00170	0,00019	-0,000002		
RT >12-14t 80ties	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,00101	0,00015	-0,000001		
RT >12-14t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,00142	0,00017	-0,000001		
RT >12-14t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,00167	0,00017	-0,000001		
RT >12-14t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,00147	0,00016	-0,000001		
RT >12-14t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,00152	0,00018	-0,000001		
RT >12-14t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,00147	0,00017	-0,000001		
RT >14-20t 80ties	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	692,850	0,06587	13057,78	0,7850	194,462
RT >14-20t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,00096	0,00014	-0,000001		
RT >14-20t Euro	FC	$y = ((a * (x^b)) + (c * (x^d)))$	0,00000	3,80778	1352,049	-0,5268	
RT >14-20t Euro	FC	$y = ((a * (x^b)) + (c * (x^d)))$	0,00001	3,42037	1550,258	-0,5524	
RT >14-20t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,00101	0,00015	-0,000001		
RT >14-20t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,00097	0,00014	-0,000001		
RT >20-26t 80ties	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	694,902	0,05466	4400,705	0,5358	220,496
RT >20-26t Euro	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	541,947	0,05305	20605,005	0,8490	192,506
RT >20-26t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,0011	0,00010	-0,000001		
RT >20-26t Euro	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	520,710	0,05095	3644,251	0,5807	190,853
RT >20-26t Euro	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	492,958	0,05133	5083,974	0,6286	178,212
RT >20-26t Euro	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	505,770	0,05113	4762,796	0,6088	180,436
RT >26-28t 80ties	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	666,989	0,05105	5141,671	0,5570	230,899
RT >26-28t Euro	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	523,536	0,04942	17421,48	0,8099	201,805
RT >26-28t Euro	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	464,244	0,04717	22777,72	0,8842	195,476
RT >26-28t Euro	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	496,038	0,04662	3798,311	0,5737	199,101
RT >26-28t Euro	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	468,860	0,04676	4328,608	0,5870	185,205
RT >26-28t Euro	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	481,369	0,04656	4106,159	0,5694	187,436
RT >28-32t 80ties	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	628,891	0,04813	68219,94	1,0523	262,117
RT >28-32t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,00106	0,00007	-0,0000004		
RT >28-32t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,00122	0,00007	-0,0000004		
RT >28-32t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,00113	0,00007	-0,0000004		
RT >28-32t Euro	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	468,053	0,04492	48602,61	1,0385	215,078
RT >28-32t Euro	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	482,568	0,04489	38612,12	0,9921	217,947
RT >32t 80ties	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	704,489	0,04757	7979,550	0,6336	254,064
RT >32t Euro-1	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	580,517	0,04648	25294,46	0,8585	224,846
RT >32t Euro-2	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	520,396	0,04429	37089,48	0,9553	218,915
RT >32t Euro-3	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	558,802	0,04449	6143,313	0,6488	221,729
RT >32t Euro-4	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	525,170	0,04465	7791,271	0,6797	206,137
RT >32t Euro-5	FC	$y = ((a * \exp(((-1) * b) * x))) + (c * \exp(((-1) * d) * x)))$	539,708	0,04465	7150,305	0,6576	208,815

Quadro A 11 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de CO para veículos pesados de mercadorias com 100% de carga [82].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	1,47468744	24,6676	-0,6393	0,2965395	0,05159
RT <=7.5t Euro-1	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,199370203	0,04113	-0,0003		
RT <=7.5t Euro-2	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,241128305	0,0498	-0,0004		
RT <=7.5t Euro-3	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	1,920257351	0,05108	2,54839	0,3027996	0,42195
RT <=7.5t Euro-4	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,03126581	0,37707	1,087	0,7847498	0,02569
RT <=7.5t Euro-5	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,030784585	0,30601	1,68849	0,9201481	0,02181
RT >7.5-12t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	7,345005679	0,05723	13,293	0,2723856	1,67796
RT >7.5-12t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	3,337158826	0,05558	6,35648	0,3127231	0,82821
RT >7.5-12t Euro	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,136363715	0,02895	-0,0002		
RT >7.5-12t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,693605912	51,3335	-1,6196	0,395682	0,04345
RT >7.5-12t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,040652261	0,49333	2,50163	1,2088945	0,0109
RT >7.5-12t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,03601319	0,44219	3,22779	1,438307	0,00142
RT >12-14t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	7,253260468	0,05356	15,053	0,2546598	1,8318
RT >12-14t Euro	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,086719762	0,02185	-0,0001		
RT >12-14t Euro	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,140168023	0,02528	-0,0002		
RT >12-14t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,806336654	26,5385	-0,6053	0,4879375	0,04336
RT >12-14t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,03481291	0,42058	3,75516	1,6377851	-0,0071
RT >12-14t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,034460389	0,43126	3,71309	1,6252717	-0,0071
RT >14-20t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	10,27222364	0,05295	18,972	0,2283578	2,28777
RT >14-20t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	4,935220568	0,05365	9,50603	0,2805728	1,13622
RT >14-20t Euro	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,091259378	0,02033	-0,0001		
RT >14-20t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	1,063163547	78,9491	-1,4732	0,457285	0,0444
RT >14-20t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,04171891	0,64527	3,58765	1,6029326	-0,0072
RT >14-20t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,04227383	0,65855	3,56576	1,5958032	-0,0068
RT >20-26t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	8,937698035	0,05715	18,4718	0,3160904	1,77301
RT >20-26t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	6,23070179	0,05173	17,5587	0,3179321	1,52044
RT >20-26t Euro	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,079078811	0,01476	-9E-05		
RT >20-26t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	1,399722527	59,2539	-0,8435	0,4841098	0,04398
RT >20-26t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	0,36981995	0,04737	0,57368	0,1628438	0,08717
RT >20-26t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,067760755	0,80023	3,26641	1,4674428	0,00219
RT >26-28t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	8,539809321	0,05325	22,5512	0,318587	1,83096
RT >26-28t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	6,002561136	0,04845	20,2144	0,3331555	1,60324
RT >26-28t Euro	CO	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp(((-1)*d)*x)))/d))$	7,412474441	0,02525	-0,3106	0,0418176	
RT >26-28t Euro	CO	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,038916816	0,0126	-6E-05		
RT >26-28t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	0,348632567	0,04158	0,68772	0,173009	0,08501
RT >26-28t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	0,355183428	0,04173	0,70422	0,1741246	0,08615
RT >28-32t 80ties	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	9,974371088	0,05404	26,2098	0,4058	2,03638
RT >28-32t Euro	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	6,85089492	0,0476	20,218	0,3947689	1,84591
RT >28-32t Euro	CO	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp(((-1)*d)*x)))/d))$	8,110079783	0,04559	-0,2971	0,0322856	
RT >28-32t Euro	CO	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp(((-1)*d)*x)))/d))$	10,91426892	0,0244	-0,5017	0,0472151	
RT >28-32t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,07792862	0,72805	3,21584	1,2937297	0,00951
RT >28-32t Euro	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,08184864	0,77712	2,90291	1,2000082	0,01269
RT >32t 80ties	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	2,092988621	124,318	-1,2811	0,4813888	0,04115
RT >32t Euro-1	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	7,414842897	0,04952	22,14	0,3447755	1,91279
RT >32t Euro-2	CO	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp(((-1)*d)*x)))/d))$	8,555801366	0,04441	-0,3262	0,0345336	
RT >32t Euro-3	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)-(d*\ln(x)))+(e*x))))$	1,746672747	64,589	-0,899	0,4262465	0,0455
RT >32t Euro-4	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	0,451876802	0,04886	0,57382	0,1731096	0,10063
RT >32t Euro-5	CO	$y=((a+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	0,449406198	0,0481	0,59077	0,1692891	0,10132

Quadro A 12 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de VOC para veículos pesados de mercadorias com 100% de carga [82].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	THC	$y = \exp((a/(b/x)) - (c \cdot \ln(x)))$	3,975182827	-3,7559	-0,9963		
RT <=7.5t Euro-1	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	0,661618754	0,04424	0,52187	0,1670244	0,13921
RT <=7.5t Euro-2	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	0,388635334	0,03913	0,40557	0,1512066	0,07987
RT <=7.5t Euro-3	THC	$y = \exp((a/(b/x)) - (c \cdot \ln(x)))$	1,53065071	-3,6285	-0,9125		
RT <=7.5t Euro-4	THC	$y = \exp((a/(b/x)) - (c \cdot \ln(x)))$	-0,965837929	-4,5228	-1,0412		
RT <=7.5t Euro-5	THC	$y = \exp((a/(b/x)) - (c \cdot \ln(x)))$	-0,942889004	-4,5676	-1,0436		
RT >7.5-12t 80ties	THC	$y = (a/(b \cdot (1 + \exp(((-1) \cdot c) + (d \cdot \ln(x)) + (e \cdot x))))$	0,161804535	6,20985	3,55225	1,5814809	-0,0064
RT >7.5-12t Euro	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	1,136490796	0,05121	1,09148	0,1283036	0,23398
RT >7.5-12t Euro	THC	$y = (a/(b \cdot (1 + \exp(((-1) \cdot c) + (d \cdot \ln(x)) + (e \cdot x))))$	0,116943876	1,3027	3,42996	1,413736	0,00978
RT >7.5-12t Euro	THC	$y = (a/(b \cdot (1 + \exp(((-1) \cdot c) + (d \cdot \ln(x)) + (e \cdot x))))$	0,083020521	1,09987	4,44788	1,7652138	-0,0031
RT >7.5-12t Euro	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	0,029228575	0,04264	0,05387	0,1185655	0,00535
RT >7.5-12t Euro	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	0,030315172	0,04284	0,05467	0,1193336	0,00548
RT >12-14t 80ties	THC	$y = (a/(b \cdot (1 + \exp(((-1) \cdot c) + (d \cdot \ln(x)) + (e \cdot x))))$	0,231110428	6,65898	3,9195	1,7494231	-0,0102
RT >12-14t Euro	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	1,00093789	0,04497	1,73697	0,1345439	0,25186
RT >12-14t Euro	THC	$y = (a/(b \cdot (1 + \exp(((-1) \cdot c) + (d \cdot \ln(x)) + (e \cdot x))))$	0,089966816	1,56092	3,62118	1,5927437	-0,0055
RT >12-14t Euro	THC	$y = (a/(b \cdot (1 + \exp(((-1) \cdot c) + (d \cdot \ln(x)) + (e \cdot x))))$	0,088387867	1,30513	4,43873	1,8633607	-0,0089
RT >12-14t Euro	THC	$y = (a/(b \cdot (1 + \exp(((-1) \cdot c) + (d \cdot \ln(x)) + (e \cdot x))))$	0,002995944	0,07587	4,42082	1,8954569	-0,013
RT >12-14t Euro	THC	$y = (a/(b \cdot (1 + \exp(((-1) \cdot c) + (d \cdot \ln(x)) + (e \cdot x))))$	0,003083011	0,07709	4,44608	1,9028511	-0,013
RT >14-20t 80ties	THC	$y = (a/(b \cdot (1 + \exp(((-1) \cdot c) + (d \cdot \ln(x)) + (e \cdot x))))$	0,362110699	9,9571	3,77701	1,708304	-0,009
RT >14-20t Euro	THC	$y = (a/(b \cdot (1 + \exp(((-1) \cdot c) + (d \cdot \ln(x)) + (e \cdot x))))$	0,193581912	3,39888	3,77525	1,6387836	-0,0068
RT >14-20t Euro	THC	$y = (a/(b \cdot (1 + \exp(((-1) \cdot c) + (d \cdot \ln(x)) + (e \cdot x))))$	0,108604082	2,4625	3,2621	1,4968859	-0,0047
RT >14-20t Euro	THC	$y = (a/(b \cdot (1 + \exp(((-1) \cdot c) + (d \cdot \ln(x)) + (e \cdot x))))$	0,107847132	2,02723	4,17073	1,7895705	-0,0092
RT >14-20t Euro	THC	$y = (a/(b \cdot (1 + \exp(((-1) \cdot c) + (d \cdot \ln(x)) + (e \cdot x))))$	0,003813624	0,11677	4,23579	1,847866	-0,0129
RT >14-20t Euro	THC	$y = (a/(b \cdot (1 + \exp(((-1) \cdot c) + (d \cdot \ln(x)) + (e \cdot x))))$	0,003435716	0,11946	4,23196	1,848316	-0,0138
RT >20-26t 80ties	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	1,56499268	0,03152	5,22799	0,1278202	0,30813
RT >20-26t Euro	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	1,348521331	0,03048	4,00936	0,1263751	0,31392
RT >20-26t Euro	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	0,75007463	0,02316	2,65632	0,1185085	0,14834
RT >20-26t Euro	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	0,634326075	0,02464	2,67228	0,1177826	0,14538
RT >20-26t Euro	THC	$y = (a/(b \cdot (1 + \exp(((-1) \cdot c) + (d \cdot \ln(x)) + (e \cdot x))))$	0,004209673	0,15764	3,74079	1,7041756	-0,0092
RT >20-26t Euro	THC	$y = (a/(b \cdot (1 + \exp(((-1) \cdot c) + (d \cdot \ln(x)) + (e \cdot x))))$	0,004232183	0,15955	3,7825	1,7160542	-0,0095
RT >26-28t 80ties	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	1,457671957	0,02627	5,5342	0,1279776	0,27741
RT >26-28t Euro	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	1,293626637	0,0286	4,17863	0,1293817	0,32337
RT >26-28t Euro	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	0,786694383	0,02118	2,72688	0,122882	0,13097
RT >26-28t Euro	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	0,666107706	0,02048	2,77536	0,1215758	0,11063
RT >26-28t Euro	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	0,047255531	0,03483	0,15599	0,1433512	0,00912
RT >26-28t Euro	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	0,047583237	0,03435	0,15919	0,1424306	0,00919
RT >28-32t 80ties	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	2,817720906	0,05048	4,27044	0,1854839	0,46381
RT >28-32t Euro	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	2,221231634	0,04743	2,81122	0,1704278	0,4694
RT >28-32t Euro	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	0,780022578	0,02406	2,23442	0,1114873	0,19032
RT >28-32t Euro	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	0,601190608	0,02203	2,14547	0,1035237	0,16022
RT >28-32t Euro	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	0,065496465	0,04644	0,10692	0,1535602	0,01156
RT >28-32t Euro	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	0,066875156	0,04624	0,10906	0,1531497	0,01174
RT >32t 80ties	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	2,420733941	0,04377	5,64056	0,1557837	0,42116
RT >32t Euro-1	THC	$y = (a/(b \cdot (1 + \exp(((-1) \cdot c) + (d \cdot \ln(x)) + (e \cdot x))))$	0,213067494	5,59326	3,06238	1,4435939	-0,0046
RT >32t Euro-2	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	0,87535383	0,02376	2,91443	0,1219051	0,16999
RT >32t Euro-3	THC	$y = ((a + (a \cdot \exp(((-1) \cdot b) \cdot x))) - (c \cdot \exp(((-1) \cdot d) \cdot x)))$	0,716814119	0,02499	2,8834	0,1187235	0,16394
RT >32t Euro-4	THC	$y = (a/(b \cdot (1 + \exp(((-1) \cdot c) + (d \cdot \ln(x)) + (e \cdot x))))$	0,003784761	0,17757	3,59607	1,664963	-0,0099
RT >32t Euro-5	THC	$y = (a/(b \cdot (1 + \exp(((-1) \cdot c) + (d \cdot \ln(x)) + (e \cdot x))))$	0,004046907	0,18099	3,5959	1,663641	-0,0095

Quadro A 13 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de NO_x para veículos pesados de mercadorias com 100% de carga [82].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	NO _x	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x))))/d)$	9,529228861	0,048	-0,2824	0,0380751	
RT <=7.5t Euro-1	NO _x	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x))))/d)$	8,073684895	0,02131	-0,3551	0,0613538	
RT <=7.5t Euro-2	NO _x	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x))))/d)$	8,906431384	0,01703	-0,4088	0,0643522	
RT <=7.5t Euro-3	NO _x	$y=((a*(b*x)))*(x^c)$	33,83691583	1,01465	-0,8426		
RT <=7.5t Euro-4	NO _x	$y=((a*(b*x)))*(x^c)$	13,64921649	1,0137	-0,7155		
RT <=7.5t Euro-5	NO _x	$y=((a*(x^b)))+(c*(x^d))$	0,004325147	1,11931	9,70113	-0,708213	
RT >7.5-12t 80ties	NO _x	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x))))/d)$	20,26148519	0,03739	-0,6621	0,0466604	
RT >7.5-12t Euro	NO _x	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	9,145067817	-0,0723	4,94411		
RT >7.5-12t Euro	NO _x	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	10,48779517	-0,0716	5,05096		
RT >7.5-12t Euro	NO _x	$y=((a*(x^b)))+(c*(x^d))$	0,2842982	0,45471	50,433	-0,770489	
RT >7.5-12t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	4,587890832	0,06678	40,543	0,5657618	2,44041
RT >7.5-12t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	2,74996268	0,06394	16,5352	0,4263455	1,41524
RT >12-14t 80ties	NO _x	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x))))/d)$	23,77926799	0,01796	-0,8036	0,0498002	
RT >12-14t Euro	NO _x	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	10,42185822	-0,0612	5,24096		
RT >12-14t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	10,90986127	0,05793	98,565	1,1140548	5,32255
RT >12-14t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	8,780338249	0,04985	35,7287	0,340996	3,9479
RT >12-14t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	5,108219564	0,0533	60,7957	0,6101234	2,55196
RT >12-14t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	3,124035465	0,05162	24,7149	0,4866456	1,47458
RT >14-20t 80ties	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	20,79706029	0,05022	75,1899	0,5972301	10,173
RT >14-20t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	12,90598887	0,05067	71,19	0,5680486	6,04269
RT >14-20t Euro	NO _x	$y=(a+(b*(1+\exp(((c-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	5,973693645	58,4143	-0,0982	0,5234914	0,03019
RT >14-20t Euro	NO _x	$y=((a*(b*x)))*(x^c)$	69,14188285	1,00495	-0,6917		
RT >14-20t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	6,677169771	0,04656	42,0785	0,4556787	2,96507
RT >14-20t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	4,100128984	0,04572	24,9616	0,4067139	1,72418
RT >20-26t 80ties	NO _x	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,027099565	0,0012	-5E-06		
RT >20-26t Euro	NO _x	$y=((a+(b*x))^(1/c))$	0,000691474	0,00018	2,06976		
RT >20-26t Euro	NO _x	$y=\exp((a+(b*x))+(c*\ln(x)))$	4,188733602	-0,9674	-0,4831		
RT >20-26t Euro	NO _x	$y=((a*(b*x)))*(x^c)$	66,1603334	1,00231	-0,5795		
RT >20-26t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	8,054057757	0,03967	80,26	0,5579728	3,64917
RT >20-26t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	5,01874224	0,04125	42,4383	0,4987096	2,15064
RT >26-28t 80ties	NO _x	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,027811641	0,00104	-4E-06		
RT >26-28t Euro	NO _x	$y=((a+(b*x))^(1/c))$	0,001598439	0,00023	1,89285		
RT >26-28t Euro	NO _x	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x))))/d)$	29,90350744	-0,0513	-1,2761	0,0690831	
RT >26-28t Euro	NO _x	$y=((a*(b*x)))*(x^c)$	65,35027344	1,00186	-0,564		
RT >26-28t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	8,421827761	0,03899	94,2446	0,604839	3,74111
RT >26-28t Euro	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	5,382603796	0,04213	57,0136	0,5639418	2,21001
RT >28-32t 80ties	NO _x	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	20,88630588	-0,0271	11,4459		
RT >28-32t Euro	NO _x	$y=((a*(x^3)))+(b*(x^2))+(c*x)+d$	-4,68688E-05	0,00868	-0,6066	26,094278	
RT >28-32t Euro	NO _x	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x))))/d)$	30,1453	-0,0589	-1,0509	0,0615404	
RT >28-32t Euro	NO _x	$y=((a+(b*x))^(1/c))$	-0,000204588	0,00017	2,15576		
RT >28-32t Euro	NO _x	$y=((a*(b*x)))*(x^c)$	27,65393414	0,9982	-0,3728		
RT >28-32t Euro	NO _x	$y=((a+(b*x))^(1/c))$	-0,00022989	0,0015	2,1215		
RT >32t 80ties	NO _x	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0,026687431	0,00067	-1E-06		
RT >32t Euro-1	NO _x	$y=((a*(x^3)))+(b*(x^2))+(c*x)+d$	-5,01698E-05	0,00931	-0,6566	27,755556	
RT >32t Euro-2	NO _x	$y=(1/(a+(b*(x^c))))$	0,024364934	0,00356	0,71319		
RT >32t Euro-3	NO _x	$y=((a*(b*x)))*(x^c)$	63,90463853	0,99963	-0,4798		
RT >32t Euro-4	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	9,520816395	0,03256	175,76	0,6852938	4,14277
RT >32t Euro-5	NO _x	$y=((a+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	5,971503781	0,03579	62,4669	0,5654429	2,47667

Quadro A 14 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de PM para veículos pesados de mercadorias com 100% de carga [82].

Segmento	Poluente	Formula (y : g/km; x : km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,00835291	0,05861	1,68686	0,2962992	0,26451
RT <=7.5t Euro-1	PM	$y=(1/(((c*(x^2))+b*x))+a))$	1,050804598	0,19649	-0,0012		
RT <=7.5t Euro-2	PM	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	0,151572927	0,00232	-0,0038	0,0166081	
RT <=7.5t Euro-3	PM	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	0,161608235	-0,0495	0,03978		
RT <=7.5t Euro-4	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,025183835	0,03706	0,07341	0,1644904	0,00585
RT <=7.5t Euro-5	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,025468522	0,03709	0,07407	0,1642246	0,00589
RT >7.5-12t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,158064081	0,0565	2,18141	0,2664623	0,26092
RT >7.5-12t Euro	PM	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,161256604	9,12237	-1,6182	0,2928651	0,05652
RT >7.5-12t Euro	PM	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	0,298367273	0,004	-0,0088	0,0197044	
RT >7.5-12t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,328711299	0,05683	0,14267	0,1746892	0,06369
RT >7.5-12t Euro	PM	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,005093945	0,16079	2,9176	1,5209141	-0,0063
RT >7.5-12t Euro	PM	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,005264317	0,16207	2,96527	1,5337443	-0,0063
RT >12-14t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,102448199	0,05246	2,50198	0,2533148	0,28303
RT >12-14t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,742743288	0,05711	0,88568	0,2145328	0,17563
RT >12-14t Euro	PM	$y=((a*(x^2)))+(b*x))+c$	5,61559E-05	-0,0067	0,29627		
RT >12-14t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,309264467	0,05528	0,27082	0,1774527	0,07091
RT >12-14t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,047058541	0,04293	0,13724	0,1661669	0,01083
RT >12-14t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,047946144	0,04291	0,13993	0,1663673	0,01096
RT >14-20t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,55318784	0,05117	3,27295	0,2308386	0,35153
RT >14-20t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,994276583	0,05335	1,45942	0,1989929	0,21298
RT >14-20t Euro	PM	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d)*x))/d))$	0,440381507	0,00389	-0,0141	0,0255439	
RT >14-20t Euro	PM	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	-0,024534016	0,8359	3,58623	1,5441202	-0,0179
RT >14-20t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,069341319	0,04326	0,20846	0,1701537	0,01468
RT >14-20t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,070873923	0,04339	0,21253	0,1708442	0,01485
RT >20-26t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,544985563	0,05028	2,92221	0,2894354	0,38335
RT >20-26t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,327774127	0,05042	2,91496	0,2464196	0,2703
RT >20-26t Euro	PM	$y=((a*(x^2)))+(b*x))+c$	0,000101588	-0,0125	0,54128		
RT >20-26t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,529815342	0,04917	0,72958	0,1885074	0,11007
RT >20-26t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,098749081	0,04703	0,2233	0,1779092	0,0179
RT >20-26t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,099827868	0,04683	0,22764	0,1769841	0,01809
RT >26-28t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,49380745	0,04631	3,47267	0,2938084	0,39578
RT >26-28t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,249155714	0,04879	3,30676	0,2515881	0,29391
RT >26-28t Euro	PM	$y=((a*(x^2)))+(b*x))+c$	0,000101948	-0,0125	0,55638		
RT >26-28t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,479913988	0,04361	0,8822	0,1955647	0,11298
RT >26-28t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,089166871	0,04281	0,24834	0,1758209	0,01758
RT >26-28t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,089408326	0,04228	0,2537	0,1745718	0,0177
RT >28-32t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,632576	0,04558	4,04846	0,3625149	0,44739
RT >28-32t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,369503006	0,04987	2,88001	0,2882986	0,34935
RT >28-32t Euro	PM	$y=((a*(x^3)))+(b*(x^2)))+(c*x))+d$	5,39204E-07	3,6E-05	-0,0106	0,5894047	
RT >28-32t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,554605883	0,04771	0,46614	0,2357446	0,13417
RT >28-32t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,096808665	0,04284	0,26362	0,176838	0,01912
RT >28-32t Euro	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,099206786	0,04271	0,2717	0,1789417	0,01929
RT >32t 80ties	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,753998858	0,04726	4,55682	0,3290898	0,45863
RT >32t Euro-1	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	1,524085362	0,04866	3,73583	0,2802118	0,34696
RT >32t Euro-2	PM	$y=((a*(x^3)))+(b*(x^2)))+(c*x))+d$	4,51206E-07	6,4E-05	-0,0131	0,6598195	
RT >32t Euro-3	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,6149295	0,04799	0,9235	0,2341633	0,1342
RT >32t Euro-4	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,113680323	0,0473	0,24483	0,1836616	0,02004
RT >32t Euro-5	PM	$y=((a+(a*\exp((-1)*b)*x)))+(c*\exp((-1)*d)*x))$	0,114785698	0,04695	0,24997	0,1823429	0,02023

Quadro A 15 – Fórmulas para cálculo do consumo de combustível para veículos pesados de mercadorias com 100% de carga [82].

Segmento	Poluente	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7,5t 80ties	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,002349551	0,00021	-2E-06		
RT <=7,5t Euro-1	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,003361162	0,00023	-2E-06		
RT <=7,5t Euro-2	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,003899021	0,00023	-2E-06		
RT <=7,5t Euro-3	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,003613833	0,00022	-2E-06		
RT <=7,5t Euro-4	FC	$y = ((a * (x^b)) + (c * (x^d)))$	0,000203497	2,73071	423,641	-0,39928	
RT <=7,5t Euro-5	FC	$y = ((a * (x^b)) + (c * (x^d)))$	0,000206429	2,72726	436,637	-0,403141	
RT >7,5-12t 80ties	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,001302799	0,00014	-1E-06		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,001774137	0,00015	-1E-06		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,002051904	0,00015	-1E-06		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,001854937	0,00014	-1E-06		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,001896074	0,00015	-1E-06		
RT >7,5-12t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,001822986	0,00015	-1E-06		
RT >12-14t 80ties	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,001120183	0,00012	-9E-07		
RT >12-14t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,001545651	0,00013	-9E-07		
RT >12-14t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,001784084	0,00013	-9E-07		
RT >12-14t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,001613703	0,00013	-9E-07		
RT >12-14t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,001673851	0,00014	-9E-07		
RT >12-14t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,001613387	0,00014	-9E-07		
RT >14-20t 80ties	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	648,2777108	0,05778	7543,45	0,6775638	207,227
RT >14-20t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,001072173	0,00011	-7E-07		
RT >14-20t Euro	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	412,8574809	0,05165	21568,4	0,9093457	172,137
RT >14-20t Euro	FC	$y = (1 / (((c * (x^2)) + (b * x)) + a))$	0,001113395	0,00011	-7E-07		
RT >14-20t Euro	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	424,9577003	0,05175	4214,69	0,6272166	164,669
RT >14-20t Euro	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	437,3499351	0,05171	4781,66	0,6367169	166,844
RT >20-26t 80ties	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	669,4407279	0,04458	5412,19	0,5671526	238,811
RT >20-26t Euro	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	538,8539156	0,04245	37865,7	0,9526323	210,266
RT >20-26t Euro	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	486,564695	0,04013	58850,8	1,0543077	203,861
RT >20-26t Euro	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	523,3909305	0,0408	12217,5	0,7879533	207,725
RT >20-26t Euro	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	489,6918331	0,04071	11992,6	0,7751039	192,686
RT >20-26t Euro	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	502,9405776	0,04077	9343,09	0,729214	195,202
RT >26-28t 80ties	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	655,594637	0,04223	7208,35	0,6116711	252,02
RT >26-28t Euro	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	532,8736169	0,03981	44924	0,9750603	220,471
RT >26-28t Euro	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	480,1977477	0,03682	63618,1	1,0629106	211,538
RT >26-28t Euro	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	515,0354208	0,03733	12509,7	0,7899696	214,904
RT >26-28t Euro	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	482,4628077	0,03719	10045,5	0,7447796	198,68
RT >26-28t Euro	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	495,7317828	0,03726	9982,97	0,7324955	201,187
RT >28-32t 80ties	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	634,0139173	0,03863	351656	1,3317899	290,232
RT >28-32t Euro	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	538,1441722	0,03592	1841399	1,6355558	252,851
RT >28-32t Euro	FC	$y = (c + (a * \exp(b * x)))$	514,9198841	-0,0359	250,502		
RT >28-32t Euro	FC	$y = (c + (a * \exp((-1)^b * x)))$	550,4293797	0,03703	255,782		
RT >28-32t Euro	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	491,0320442	0,03341	861522	1,5365767	227,246
RT >28-32t Euro	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	500,1444118	0,0328	18756	0,9258784	228,023
RT >32t 80ties	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	721,6678587	0,03676	20235,5	0,8044963	276,597
RT >32t Euro-1	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	616,92898	0,03551	154561	1,1806705	244,387
RT >32t Euro-2	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	564,1391862	0,03221	441222	1,3888034	232,172
RT >32t Euro-3	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	601,6323071	0,03355	89962,5	1,1210943	237,525
RT >32t Euro-4	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	557,7146101	0,0328	48115,4	1,0074391	216,551
RT >32t Euro-5	FC	$y = ((a * \exp((-1)^b * x)) + (c * \exp((-1)^d * x)))$	572,030071	0,03293	37047,2	0,9542699	219,369

Quadro A 16 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de CO para veículos pesados de passageiros com 0% de carga [82].

Subsegment	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
Coach Std <=18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	7.998942	0.045091	14.7117	0.194689	1.125625
Coach Std <=18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	5.830689	0.043086	11.02878	0.177595	0.945455
Coach Std <=18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	5.91752	0.054595	14.52722	0.234033	0.944255
Coach Std <=18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	6.370806	0.045891	14.3162	0.214688	1.042333
Coach Std <=18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.555901	0.048799	1.349717	0.201486	0.083153
Coach Std <=18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.569769	0.048426	1.393567	0.201103	0.084774
Coach 3-Axes >18t 80ties	$y=(a+(b/(1+\exp(((1-c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0.796826	26.49863	2.408048	1.350183	-0.001
Coach 3-Axes >18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	5.766351	0.042155	14.53792	0.171342	1.140055
Coach 3-Axes >18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	5.513595	0.050573	15.57914	0.202278	1.055021
Coach 3-Axes >18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	6.211438	0.041776	18.52267	0.19322	1.06304
Coach 3-Axes >18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.511552	0.044145	1.550202	0.186206	0.083545
Coach 3-Axes >18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.526465	0.044057	1.595793	0.186078	0.08547
Ubus Midi <=15t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	13.5201	0.062825	32.84901	0.370355	2.48465
Ubus Midi <=15t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	4.425808	0.056341	6.665841	0.232334	0.724631
Ubus Midi <=15t Euro-2	$y=(a+(b/(1+\exp(((1-c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0.224306	8.047672	3.572967	1.670294	-0.00921
Ubus Midi <=15t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	3.878009	0.049645	5.417974	0.186813	0.624641
Ubus Midi <=15t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.452188	0.06174	0.719559	0.268432	0.056248
Ubus Midi <=15t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.458572	0.061716	0.740006	0.269945	0.057321
Ubus Std >15-18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	12.96961	0.054086	28.56999	0.255026	1.937024
Ubus Std >15-18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	5.239619	0.049113	8.023129	0.200843	0.847954
Ubus Std >15-18t Euro-2	$y=(a+(b/(1+\exp(((1-c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0.362028	9.652152	3.500249	1.600548	-0.0061
Ubus Std >15-18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	4.237411	-3.21755	-1.00556		
Ubus Std >15-18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.539359	0.0554	0.960815	0.271175	0.066487
Ubus Std >15-18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.543737	0.055219	0.978611	0.271735	0.06718
Ubus Artic >18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	13.79189	0.050569	25.67427	0.211801	2.253775
Ubus Artic >18t Euro-1	$y=(1/((a+(b*x))))$	0.053466	0.011338			
Ubus Artic >18t Euro-2	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x)))/d))$	12.9639	-0.0173	-1.0891	0.099805	
Ubus Artic >18t Euro-3	$y=\exp(a+(b/x))+(c*\ln(x))$	4.593015	-3.9099	-1.04497		
Ubus Artic >18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.660656	0.055222	0.823682	0.232699	0.077282
Ubus Artic >18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.666156	0.055224	0.837822	0.234359	0.078001

Quadro A 17 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de NOx para veículos pesados de passageiros com 0% de carga [82].

Subsegment	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
Coach Std <=18t 80ties	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0.012603	0.003002	-2E-05		
Coach Std <=18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	22.1067	0.062876	76.60349	0.362558	5.957076
Coach Std <=18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	24.30588	0.059394	73.00523	0.336642	6.581691
Coach Std <=18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	21.78823	0.054342	89.04304	0.24515	5.149501
Coach Std <=18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	12.34057	0.055078	45.89428	0.271774	3.174945
Coach Std <=18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	7.888633	0.055204	32.21651	0.25567	1.883141
Coach 3-Axes >18t 80ties	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a))$	0.010678	0.002422	-1.5E-05		
Coach 3-Axes >18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	24.81327	0.05806	84.31507	0.348283	6.815152
Coach 3-Axes >18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	26.1548	0.055444	77.0633	0.312154	7.342423
Coach 3-Axes >18t Euro-3	$y=((a*(b*x))^(x^c))$	259.5229	1.008592	-1.02588		
Coach 3-Axes >18t Euro-4	$y=((a*(b*x))^(x^c))$	110.6667	1.006947	-0.91603		
Coach 3-Axes >18t Euro-5	$y=((a*(b*x))^(x^c))$	81.76707	1.007934	-0.97944		
Ubus Midi <=15t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	21.79652	0.081154	34493.32	1.559485	6.499624
Ubus Midi <=15t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	17.55654	0.080999	986.3499	0.991864	4.554649
Ubus Midi <=15t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	18.02473	0.076982	349.5241	0.775007	4.853637
Ubus Midi <=15t Euro-3	$y=(a+(b/(1+\exp(((1-c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	1.844737	97.14887	0.925994	1.210921	-0.00122
Ubus Midi <=15t Euro-4	$y=(a+(b/(1+\exp(((1-c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	1.883181	57.21241	0.274722	0.967678	0.021878
Ubus Midi <=15t Euro-5	$y=(a+(b/(1+\exp(((1-c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0.80112	22.24711	1.652852	1.324627	-0.00087
Ubus Std >15-18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	31.83918	0.074864	69354.16	1.604721	9.909233
Ubus Std >15-18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	22.36017	0.079224	4200.631	1.203852	5.969029
Ubus Std >15-18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	23.52993	0.076432	1237.42	0.967295	6.318989
Ubus Std >15-18t Euro-3	$y=(a+(b/(1+\exp(((1-c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	3.546874	90.39407	1.385683	1.248627	0.007924
Ubus Std >15-18t Euro-4	$y=(a+(b/(1+\exp(((1-c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	2.666701	72.66074	0.106876	0.869381	0.030595
Ubus Std >15-18t Euro-5	$y=(a+(b/(1+\exp(((1-c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	1.384147	23.76657	1.85222	1.30918	0.009487
Ubus Artic >18t 80ties	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	37.23276	-0.07314	12.11048		
Ubus Artic >18t Euro-1	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x)))/d))$	35.3035	-0.02418	-2.4043	0.089934	
Ubus Artic >18t Euro-2	$y=(a+(b/(1+\exp(((1-c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	7.208453	165.3811	-0.92517	0.455566	0.046573
Ubus Artic >18t Euro-3	$y=(a+(b/(1+\exp(((1-c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	4.290929	93.77408	1.394286	1.201991	0.008479
Ubus Artic >18t Euro-4	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x)))/d))$	27.00406	-0.02975	-2.52905	0.116283	
Ubus Artic >18t Euro-5	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x)))/d))$	19.98526	-0.02155	-2.09395	0.125547	

Quadro A 18 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de PM para veículos pesados de passageiros com 0% de carga [82].

Subsegment	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
Coach Std <=18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	1.485945	0.04582	2.288555	0.207516	0.257476
Coach Std <=18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	1.122261	0.040222	1.350413	0.171204	0.175077
Coach Std <=18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.444899	0.04947	0.588267	0.230939	0.106394
Coach Std <=18t Euro-3	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.081274	0.984218	2.783494	1.201769	0.009398
Coach Std <=18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.143135	0.051369	0.458074	0.225837	0.019925
Coach Std <=18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.147448	0.051188	0.473172	0.225785	0.0204
Coach 3-Axes >18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	1.595998	0.047195	3.425815	0.215062	0.323299
Coach 3-Axes >18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	1.1955	0.043116	2.10556	0.184101	0.225249
Coach 3-Axes >18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.481968	0.053152	0.690586	0.216839	0.126007
Coach 3-Axes >18t Euro-3	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.058339	1.404639	3.4266	1.572178	-0.00612
Coach 3-Axes >18t Euro-4	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.017501	2.182193	-0.19495	0.979354	0.018148
Coach 3-Axes >18t Euro-5	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.017877	2.249592	-0.1969	0.97904	0.018081
Ubuss Midi <=15t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	2.605782	0.061839	6.374791	0.30897	0.416932
Ubuss Midi <=15t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.854121	0.065119	4.748793	0.621911	0.163126
Ubuss Midi <=15t Euro-2	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	0.444413	-0.08499	0.083839		
Ubuss Midi <=15t Euro-3	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.081849	0.869312	-0.01741	0.305812	0.060692
Ubuss Midi <=15t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.108478	0.066836	0.325616	0.314649	0.013894
Ubuss Midi <=15t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.11135	0.067037	0.336385	0.317106	0.014198
Ubuss Std >15-18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	2.165868	0.055976	4.965268	0.254467	0.313815
Ubuss Std >15-18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.99159	0.052273	1.611258	0.292405	0.180216
Ubuss Std >15-18t Euro-2	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	0.506497	0.071686	0.105392		
Ubuss Std >15-18t Euro-3	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.090692	1.155339	-0.00982	0.330919	0.04771
Ubuss Std >15-18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.132608	0.061406	0.422293	0.311096	0.016306
Ubuss Std >15-18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.134956	0.061428	0.429938	0.311471	0.016557
Ubuss Artic >18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	2.329389	0.05298	4.566275	0.223496	0.362121
Ubuss Artic >18t Euro-1	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0.377978	0.064951	-0.00014		
Ubuss Artic >18t Euro-2	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	0.561064	-0.06331	0.125228		
Ubuss Artic >18t Euro-3	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.100923	1.277414	-0.04339	0.305217	0.047531
Ubuss Artic >18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.147825	0.060371	0.449618	0.304334	0.018037
Ubuss Artic >18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.15046	0.06051	0.458613	0.30552	0.018295

Quadro A 19 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de VOC para veículos pesados de passageiros com 0% de carga [82].

Subsegment	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
Coach Std <=18t 80ties	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0.109624	0.021575	6.43E-05		
Coach Std <=18t Euro-1	$y=(1/(a+(b*(x^c))))$	0.145457	0.021552	1.050819		
Coach Std <=18t Euro-2	$y=(1/(a+(b*x)))$	0.173126	0.040274			
Coach Std <=18t Euro-3	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.223462	16.91797	-0.63309	0.641431	0.025933
Coach Std <=18t Euro-4	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.010703	1.110668	-0.69373	0.697027	0.02365
Coach Std <=18t Euro-5	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.011074	1.219397	-0.77258	0.690994	0.02369
Coach 3-Axes >18t 80ties	$y=(1/(a+(b*x)))$	0.060583	0.022633			
Coach 3-Axes >18t Euro-1	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.382427	16.84392	0.339458	0.816775	0.018671
Coach 3-Axes >18t Euro-2	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.252465	23.47636	-0.70875	0.704346	0.022661
Coach 3-Axes >18t Euro-3	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.113684	5.046008	3.145845	1.565914	-0.0066
Coach 3-Axes >18t Euro-4	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.006111	0.294123	3.001093	1.543955	-0.00468
Coach 3-Axes >18t Euro-5	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.006372	0.302389	3.004314	1.544636	-0.00458
Ubuss Midi <=15t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	9.003986	0.059695	56.07767	0.448028	1.596214
Ubuss Midi <=15t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	1.620646	0.060951	16.62831	0.572938	0.325634
Ubuss Midi <=15t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	1.114892	0.062454	10.24628	0.546961	0.210557
Ubuss Midi <=15t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.961819	0.061114	11.47097	0.603768	0.189452
Ubuss Midi <=15t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.054739	0.062089	0.449854	0.530365	0.009291
Ubuss Midi <=15t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.056242	0.062207	0.473041	0.535915	0.009562
Ubuss Std >15-18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	5.290214	0.051078	28.04192	0.358849	0.770046
Ubuss Std >15-18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	1.959975	0.051304	12.7212	0.441529	0.346386
Ubuss Std >15-18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	1.404232	0.056057	11.85919	0.518574	0.238593
Ubuss Std >15-18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	1.191342	0.052822	11.37455	0.5371	0.206525
Ubuss Std >15-18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.068282	0.05411	0.525318	0.49506	0.009976
Ubuss Std >15-18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.069717	0.054166	0.542544	0.498222	0.010206
Ubuss Artic >18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	5.776272	0.051785	30.91348	0.357332	0.794793
Ubuss Artic >18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	2.151062	0.051964	13.5856	0.439689	0.375653
Ubuss Artic >18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	1.519569	0.056107	12.19546	0.508149	0.25673
Ubuss Artic >18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	1.290634	0.053354	11.58292	0.524577	0.221684
Ubuss Artic >18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.073933	0.054575	0.539131	0.48027	0.01058
Ubuss Artic >18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.075267	0.054548	0.55435	0.482138	0.01079

Quadro A 20 – Fórmulas para cálculo do factor de consumo para veículos pesados de passageiros com 0% de carga [82].

Subsegment	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
Coach Std <=18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	746.9908	0.056259	2046.349	0.352335	180.4981
Coach Std <=18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	648.8024	0.054408	2655.65	0.401064	165.2382
Coach Std <=18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	594.0131	0.05163	2921.989	0.423127	166.0862
Coach Std <=18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	708.0736	0.055349	3362.341	0.431499	185.3243
Coach Std <=18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	686.8398	0.055687	3621.08	0.438098	175.2645
Coach Std <=18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	714.5066	0.055414	3670.184	0.431329	179.6608
Coach 3-Axes >18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	924.5337	0.058603	3832.626	0.422742	219.2546
Coach 3-Axes >18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	757.5551	0.056285	4210.13	0.453667	192.3722
Coach 3-Axes >18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	700.7278	0.055043	4542.4	0.48286	191.0958
Coach 3-Axes >18t Euro-3	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0.000308	0.000104	-5.5E-07		
Coach 3-Axes >18t Euro-4	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0.00031	0.000109	-5.7E-07		
Coach 3-Axes >18t Euro-5	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0.000298	0.000104	-5.4E-07		
Ubus Midi <=15t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	725.8712	0.081247	155164.5	1.181381	174.2188
Ubus Midi <=15t Euro-1	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0.000797	0.0002	-1.6E-06		
Ubus Midi <=15t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	486.6406	0.080972	1196063	1.629846	134.0512
Ubus Midi <=15t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	522.6761	0.081014	1093462	1.603806	141.8516
Ubus Midi <=15t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	509.5855	0.080964	290717.1	1.376239	133.6555
Ubus Midi <=15t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	527.6906	0.080816	262110.4	1.348494	136.5565
Ubus Std >15-18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	790.3517	0.069843	35043.6	0.870545	200.371
Ubus Std >15-18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	650.6739	0.07304	240583.5	1.278808	172.0502
Ubus Std >15-18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	592.8845	0.072884	2373425	1.699545	169.6729
Ubus Std >15-18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	632.6732	0.072965	2412225	1.693504	177.6863
Ubus Std >15-18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	619.8745	0.07386	577120.2	1.449455	167.4396
Ubus Std >15-18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	638.5628	0.073721	470765.1	1.408442	170.5332
Ubus Artic >18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	891.4559	0.068074	145960.7	1.114684	238.6592
Ubus Artic >18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	708.3956	0.06812	2169620	1.645694	207.1906
Ubus Artic >18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	632.5804	0.066173	26151233	2.093122	204.1631
Ubus Artic >18t Euro-3	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	741.0665	-0.07214	216.4697		
Ubus Artic >18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	664.7677	0.068031	4886665	1.799212	200.0394
Ubus Artic >18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	684.8407	0.068104	3844376	1.752679	203.6089

Quadro A 21 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de CO para veículos pesados de passageiros com 50% de carga [82].

Subsegment	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
Coach Std <=18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	8.434481	0.047015	17.71567	0.223856	1.237414
Coach Std <=18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	6.041642	0.04395	12.88066	0.202538	1.019743
Coach Std <=18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	5.925346	0.052615	16.03187	0.244224	1.000885
Coach Std <=18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	6.468232	0.045791	15.00103	0.221905	1.086326
Coach Std <=18t Euro-4	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.068173	2.168902	1.692317	1.154878	0.012652
Coach Std <=18t Euro-5	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.06861	2.27015	1.656147	1.14945	0.012349
Coach 3-Axes >18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	9.325461	0.049398	23.34875	0.229078	1.595779
Coach 3-Axes >18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	6.347466	0.04397	16.76044	0.203867	1.274968
Coach 3-Axes >18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	6.029067	0.049881	17.90164	0.228574	1.169714
Coach 3-Axes >18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	6.39466	0.041484	20.83666	0.210747	1.150762
Coach 3-Axes >18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.500037	0.043136	1.608189	0.190566	0.086654
Coach 3-Axes >18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.515361	0.043087	1.651127	0.190269	0.088166
Ubus Midi <=15t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	14.35551	0.063189	29.61078	0.359008	2.533103
Ubus Midi <=15t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	4.385589	0.053583	5.65835	0.191888	0.77137
Ubus Midi <=15t Euro-2	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)^c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.294444	7.678113	3.893139	1.693726	-0.0067
Ubus Midi <=15t Euro-3	$y=\exp((a+(b/x)))+(c*\ln(x))$	4.164445	-3.51975	-1.03847		
Ubus Midi <=15t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.480237	0.059837	0.601169	0.231299	0.057418
Ubus Midi <=15t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.491329	0.060403	0.630378	0.239286	0.058826
Ubus Std >15-18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	12.48877	0.050526	23.5557	0.211694	2.060097
Ubus Std >15-18t Euro-1	$y=(1/(a+(b*x)))$	0.059028	0.012379			
Ubus Std >15-18t Euro-2	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)^d*x)))/d)$	11.89553	-0.01594	-1.00479	0.100335	
Ubus Std >15-18t Euro-3	$y=\exp((a+(b/x)))+(c*\ln(x))$	4.494592	-3.87613	-1.04288		
Ubus Std >15-18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.603609	0.055585	0.757441	0.236885	0.070341
Ubus Std >15-18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.609774	0.055485	0.7939	0.241724	0.070888
Ubus Artic >18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	12.65386	0.044786	20.70587	0.151277	2.56783
Ubus Artic >18t Euro-1	$y=(1/(a+(b*x)))$	0.056568	0.009036			
Ubus Artic >18t Euro-2	$y=\exp((a+(b/x)))+(c*\ln(x))$	5.081678	-4.97131	-1.14386		
Ubus Artic >18t Euro-3	$y=\exp((a+(b/x)))+(c*\ln(x))$	5.042058	-5.1621	-1.11681		
Ubus Artic >18t Euro-4	$y=\exp((a+(b/x)))+(c*\ln(x))$	3.056687	-5.958	-1.26668		
Ubus Artic >18t Euro-5	$y=\exp((a+(b/x)))+(c*\ln(x))$	3.026145	-5.8259	-1.25677		

Quadro A 22 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de NOx para veículos pesados de passageiros com 50% de carga [82].

Subsegment	Pollutant	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
Coach Std <=18t 80ties	NOx	$y = (1 / (((c * x^2) + (b * x)) + a))$	0.015356	0.002522	-1.6E-05		
Coach Std <=18t Euro-1	NOx	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	21.4907	0.058334	85.77664	0.382957	6.316706
Coach Std <=18t Euro-2	NOx	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	24.21377	0.056572	81.21485	0.358043	6.83481
Coach Std <=18t Euro-3	NOx	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	21.88122	0.052997	90.05514	0.24765	5.305427
Coach Std <=18t Euro-4	NOx	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	12.35359	0.053104	47.19571	0.277569	3.28872
Coach Std <=18t Euro-5	NOx	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	7.887178	0.053446	32.7918	0.259124	1.948374
Coach 3-Axes >18t 80ties	NOx	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	29.34314	0.050675	97.43023	0.376677	9.895034
Coach 3-Axes >18t Euro-1	NOx	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	24.33299	0.052583	94.20129	0.373081	7.325924
Coach 3-Axes >18t Euro-2	NOx	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	26.18928	0.05124	84.58768	0.334831	7.741795
Coach 3-Axes >18t Euro-3	NOx	$y = ((a * (b * x)) * (x^c))$	237.2257	1.007611	-0.97137		
Coach 3-Axes >18t Euro-4	NOx	$y = ((a * (b * x)) * (x^c))$	99.13921	1.005618	-0.84854		
Coach 3-Axes >18t Euro-5	NOx	$y = ((a * (b * x)) * (x^c))$	74.17645	1.006824	-0.92026		
Ubus Midi <=15t 80ties	NOx	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	21.08763	0.074846	688321.5	2.067077	6.995002
Ubus Midi <=15t Euro-1	NOx	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	17.54621	0.076207	17248.39	1.49077	4.987433
Ubus Midi <=15t Euro-2	NOx	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	18.51367	0.074043	2779.013	1.148754	5.25154
Ubus Midi <=15t Euro-3	NOx	$y = (a / (b / (1 + \exp(((-1)^c * x) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	1.983329	92.13714	0.919753	1.16006	-0.00049
Ubus Midi <=15t Euro-4	NOx	$y = (a / (b / (1 + \exp(((-1)^c * x) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	1.982994	31.45223	1.181033	1.057664	0.015195
Ubus Midi <=15t Euro-5	NOx	$y = (a / (b * \exp(((-1)^c * x^d))))$	1.085302	-126.049	1.668316	0.303069	
Ubus Std >15-18t 80ties	NOx	$y = (c + (a * \exp(((-1)^b * x)))$	33.63588	0.071919	10.94056		
Ubus Std >15-18t Euro-1	NOx	$y = ((a + (b * x)) + (((c - b) * (1 - \exp(((-1)^d * x))) / d))$	31.9073	-0.02165	-2.13385	0.088303	
Ubus Std >15-18t Euro-2	NOx	$y = ((a + (b * x)) + (((c - b) * (1 - \exp(((-1)^d * x))) / d))$	6.537233	128.9183	-0.74916	0.452362	0.047072
Ubus Std >15-18t Euro-3	NOx	$y = ((a + (b * x)) + (((c - b) * (1 - \exp(((-1)^d * x))) / d))$	3.972045	93.40115	1.166371	1.13975	0.011524
Ubus Std >15-18t Euro-4	NOx	$y = ((a + (b * x)) + (((c - b) * (1 - \exp(((-1)^d * x))) / d))$	24.21603	-0.02712	-2.22459	0.11435	
Ubus Std >15-18t Euro-5	NOx	$y = ((a + (b * x)) + (((c - b) * (1 - \exp(((-1)^d * x))) / d))$	17.99674	-0.01991	-1.86169	0.12424	
Ubus Artic >18t 80ties	NOx	$y = (c + (a * \exp(b * x)))$	34.4112	-0.05981	13.41273		
Ubus Artic >18t Euro-1	NOx	$y = (c + (a * \exp(b * x)))$	24.54694	-0.06593	8.215607		
Ubus Artic >18t Euro-2	NOx	$y = ((a + (b * x)) + (((c - b) * (1 - \exp(((-1)^d * x))) / d))$	37.65848	-0.03894	-2.23939	0.082514	
Ubus Artic >18t Euro-3	NOx	$y = ((a + (b * x)) + (((c - b) * (1 - \exp(((-1)^d * x))) / d))$	58.70345	-0.0727	-5.89099	0.122268	
Ubus Artic >18t Euro-4	NOx	$y = ((a + (b * x)) + (((c - b) * (1 - \exp(((-1)^d * x))) / d))$	25.91739	-0.03477	-2.07113	0.104239	
Ubus Artic >18t Euro-5	NOx	$y = ((a + (b * x)) + (((c - b) * (1 - \exp(((-1)^d * x))) / d))$	19.30831	-0.02534	-1.79025	0.115422	

Quadro A 23 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de PM para veículos pesados de passageiros com 50% de carga [82].

Subsegment	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
Coach Std <=18t 80ties	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	1.507975	0.045515	2.675004	0.230307	0.277394
Coach Std <=18t Euro-1	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	1.118543	0.040239	1.434309	0.177602	0.186272
Coach Std <=18t Euro-2	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	0.424929	0.044499	0.79213	0.259272	0.109357
Coach Std <=18t Euro-3	$y = (a / (b / (1 + \exp(((-1)^c * x) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0.082467	1.068203	2.350972	1.081879	0.011843
Coach Std <=18t Euro-4	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	0.14512	0.052008	0.46085	0.227088	0.020223
Coach Std <=18t Euro-5	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	0.148559	0.051606	0.47331	0.225594	0.02065
Coach 3-Axes >18t 80ties	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	1.65505	0.046167	3.996303	0.244753	0.346215
Coach 3-Axes >18t Euro-1	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	1.257195	0.044283	2.272239	0.206582	0.245474
Coach 3-Axes >18t Euro-2	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	0.474657	0.046836	0.942101	0.254013	0.134622
Coach 3-Axes >18t Euro-3	$y = (a / (b / (1 + \exp(((-1)^c * x) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0.057318	1.545648	2.977641	1.450923	-0.00446
Coach 3-Axes >18t Euro-4	$y = (a / (b / (1 + \exp(((-1)^c * x) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0.017532	1.9111	-0.01602	1.000504	0.016926
Coach 3-Axes >18t Euro-5	$y = (a / (b / (1 + \exp(((-1)^c * x) + (d * \ln(x))) + (e * x))))$	0.017847	1.973821	-0.01919	1.000888	0.016789
Ubus Midi <=15t 80ties	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	2.719804	0.061534	6.241845	0.305663	0.428892
Ubus Midi <=15t Euro-1	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	0.924002	0.066596	32.66992	0.994841	0.174842
Ubus Midi <=15t Euro-2	$y = (c + (a * \exp(b * x)))$	0.415453	-0.07267	0.089367		
Ubus Midi <=15t Euro-3	$y = (c + (a * \exp(b * x)))$	0.363234	-0.06656	0.082488		
Ubus Midi <=15t Euro-4	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	0.109052	0.06538	0.321727	0.308516	0.013846
Ubus Midi <=15t Euro-5	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	0.111691	0.065647	0.330101	0.309718	0.014171
Ubus Std >15-18t 80ties	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	2.126261	0.053176	4.319751	0.223815	0.330393
Ubus Std >15-18t Euro-1	$y = (1 / (((c * x^2) + (b * x)) + a))$	0.411713	0.070726	-0.00015		
Ubus Std >15-18t Euro-2	$y = (c + (a * \exp(b * x)))$	0.517385	-0.06333	0.114057		
Ubus Std >15-18t Euro-3	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	0.453226	0.055584	1250.735	1.742779	0.09414
Ubus Std >15-18t Euro-4	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	0.13513	0.060744	0.405571	0.304359	0.016398
Ubus Std >15-18t Euro-5	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	0.137705	0.060788	0.418522	0.306683	0.016625
Ubus Artic >18t 80ties	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	2.260809	0.049118	3.986257	0.179932	0.409721
Ubus Artic >18t Euro-1	$y = (1 / (((c * x^2) + (b * x)) + a))$	0.394092	0.055409	-0.00013		
Ubus Artic >18t Euro-2	$y = (c + (a * \exp(b * x)))$	0.617661	-0.05493	0.138689		
Ubus Artic >18t Euro-3	$y = (c + (a * \exp(b * x)))$	0.536012	-0.05619	0.112193		
Ubus Artic >18t Euro-4	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	0.153145	0.059159	0.415537	0.29203	0.017814
Ubus Artic >18t Euro-5	$y = ((e + (a * \exp(((-1)^b * x))) + (c * \exp(((-1)^d * x))))$	0.154784	0.0591	0.422852	0.291551	0.018092

Quadro A 24 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de VOC para veículos pesados de passageiros com 50% de carga [82].

Subsegment	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
Coach Std <=18t 80ties	$y=((a+(b*x))^{(-1)/c})$	0.164335	0.023674	0.837803		
Coach Std <=18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	2.173313	0.037439	3.415661	0.151044	0.332352
Coach Std <=18t Euro-2	$y=(1/(a+(b*x)))$	0.170453	0.040964			
Coach Std <=18t Euro-3	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0.227231	15.6624	-0.53083	0.648939	0.027034
Coach Std <=18t Euro-4	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0.010906	1.021473	-0.58142	0.706338	0.024722
Coach Std <=18t Euro-5	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0.011266	1.053054	-0.5827	0.705085	0.0246
Coach 3-Axes >18t 80ties	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0.360926	15.03228	1.01765	0.96255	0.01576
Coach 3-Axes >18t Euro-1	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0.379844	12.41285	0.870242	0.894906	0.017631
Coach 3-Axes >18t Euro-2	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0.256116	29.89036	-1.02196	0.679831	0.024364
Coach 3-Axes >18t Euro-3	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0.131941	4.750571	3.353372	1.627223	-0.00644
Coach 3-Axes >18t Euro-4	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0.005729	0.275707	3.264375	1.628532	-0.00696
Coach 3-Axes >18t Euro-5	$y=(a+(b/(1+\exp(((((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))))$	0.005532	0.28552	3.249249	1.625757	-0.00746
Ubus Midi <=15t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	8.953378	0.060292	54.1532	0.438063	1.522759
Ubus Midi <=15t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1.632365	0.061948	15.70697	0.564904	0.322111
Ubus Midi <=15t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1.11189	0.062937	9.647315	0.536034	0.207062
Ubus Midi <=15t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.950389	0.061675	9.849427	0.572444	0.184811
Ubus Midi <=15t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.053917	0.062467	0.404736	0.504847	0.008943
Ubus Midi <=15t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.055398	0.062656	0.421504	0.508977	0.009216
Ubus Std >15-18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	5.276835	0.052255	28.16318	0.358045	0.729006
Ubus Std >15-18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1.975562	0.052456	12.45092	0.441753	0.344339
Ubus Std >15-18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1.394025	0.056647	10.98284	0.507803	0.235792
Ubus Std >15-18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1.180182	0.05396	10.3079	0.521837	0.203553
Ubus Std >15-18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.067341	0.055134	0.475556	0.476333	0.009711
Ubus Std >15-18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.068842	0.055207	0.493662	0.480011	0.009923
Ubus Artic >18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	5.632467	0.052965	30.25213	0.349577	0.756423
Ubus Artic >18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	2.115131	0.052693	12.51307	0.427368	0.385703
Ubus Artic >18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1.48651	0.056335	11.2187	0.493082	0.257893
Ubus Artic >18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1.258678	0.054057	10.27376	0.501389	0.219165
Ubus Artic >18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.072107	0.055497	0.489205	0.458444	0.010341
Ubus Artic >18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.073558	0.055519	0.499673	0.460022	0.010534

Quadro A 25 – Fórmulas para cálculo do factor de consumo para veículos pesados de passageiros com 50% de carga [82].

Subsegment	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
Coach Std <=18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	738.281	0.05303	2369.613	0.3816	191.094
Coach Std <=18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	646.643	0.05142	3159.819	0.4328	175.162
Coach Std <=18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	596.163	0.04897	3566.314	0.4591	173.848
Coach Std <=18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	700.027	0.05283	3813.803	0.4522	191.108
Coach Std <=18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	684.674	0.05367	4077.740	0.4583	180.598
Coach Std <=18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	712.580	0.05354	4086.275	0.4498	184.823
Coach 3-Axes >18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	898.997	0.05401	4451.058	0.4497	234.426
Coach 3-Axes >18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	747.184	0.05158	5103.046	0.4873	207.151
Coach 3-Axes >18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	692.917	0.05011	5741.372	0.5228	204.667
Coach 3-Axes >18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	765.975	0.04919	1835.950	0.2777	199.048
Coach 3-Axes >18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	749.124	0.05019	1990.590	0.2965	188.530
Coach 3-Axes >18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	778.333	0.04985	2050.906	0.2918	193.555
Ubus Midi <=15t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	728.021	0.07844	911005.6	1.4910	185.311
Ubus Midi <=15t Euro-1	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0.00094	0.00017	-0.000001		
Ubus Midi <=15t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	474.497	0.07433	10230354	1.9942	146.568
Ubus Midi <=15t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	506.669	0.07463	13593125	2.0314	154.224
Ubus Midi <=15t Euro-4	$y=(1/(((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0.00099	0.00017	-0.000001		
Ubus Midi <=15t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	519.501	0.07559	1596867	1.6599	148.314
Ubus Std >15-18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	812.928	0.06782	156466.3	1.1466	216.444
Ubus Std >15-18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	650.877	0.06753	2948894	1.7128	189.016
Ubus Std >15-18t Euro-2	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	640.218	-0.07126	189.916		
Ubus Std >15-18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	617.447	0.06592	52222212	2.2155	193.611
Ubus Std >15-18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	611.197	0.06760	8033393	1.9004	182.663
Ubus Std >15-18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	631.204	0.06775	5907007	1.8418	185.997
Ubus Artic >18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	897.360	0.06334	2210881	1.5906	268.416
Ubus Artic >18t Euro-1	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	762.519	-0.06457	240.163		
Ubus Artic >18t Euro-2	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	660.838	-0.05989	234.616		
Ubus Artic >18t Euro-3	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	697.733	-0.06059	242.116		
Ubus Artic >18t Euro-4	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	703.747	-0.06364	229.333		
Ubus Artic >18t Euro-5	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	727.767	-0.06405	233.470		

Quadro A 26 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de CO para veículos pesados de passageiros com 100% de carga [82].

Subsegment	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
Coach Std <=18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	8.781331	0.04675	23.05287	0.260072	1.299744
Coach Std <=18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	6.379452	0.044275	15.40764	0.237452	1.109574
Coach Std <=18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	6.154084	0.051572	17.8022	0.260821	1.071869
Coach Std <=18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	6.7558	0.046706	15.24869	0.22721	1.146468
Coach Std <=18t Euro-4	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)^c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.073811	2.264001	1.547342	1.100176	0.015996
Coach Std <=18t Euro-5	$y=(a+(b/(1+\exp(((1)^c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.073955	2.34332	1.550279	1.106998	0.01522
Coach 3-Axes >18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	9.589252	0.047984	28.59438	0.254458	1.680975
Coach 3-Axes >18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	6.819049	0.043053	22.33769	0.253046	1.393995
Coach 3-Axes >18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	6.427625	0.047196	20.91638	0.253708	1.246533
Coach 3-Axes >18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	6.625758	0.04092	22.74022	0.224767	1.227998
Coach 3-Axes >18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.506901	0.042877	1.652055	0.196524	0.089541
Coach 3-Axes >18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.521665	0.042955	1.693838	0.195806	0.091123
Ubus Midi <=15t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	14.75243	0.062355	23.04778	0.315294	2.646946
Ubus Midi <=15t Euro-1	$y=(1/((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	0.066237	0.016442	-2.5E-05		
Ubus Midi <=15t Euro-2	$y=\exp((a+(b/x))+(c*\ln(x)))$	4.538789	-4.11552	-1.13228		
Ubus Midi <=15t Euro-3	$y=\exp((a+(b/x))+(c*\ln(x)))$	4.398408	-4.15424	-1.07384		
Ubus Midi <=15t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.548476	0.060551	0.507702	0.22147	0.059543
Ubus Midi <=15t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0.548291	0.060268	0.520005	0.217434	0.060448
Ubus Std >15-18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	11.78208	0.04641	19.88235	0.167319	2.217989
Ubus Std >15-18t Euro-1	$y=(1/(a+(b*x)))$	0.060812	0.010678			
Ubus Std >15-18t Euro-2	$y=\exp((a+(b/x))+(c*\ln(x)))$	4.770117	-4.30981	-1.10501		
Ubus Std >15-18t Euro-3	$y=\exp((a+(b/x))+(c*\ln(x)))$	4.753799	-4.57897	-1.08057		
Ubus Std >15-18t Euro-4	$y=\exp((a+(b/x))+(c*\ln(x)))$	2.684022	-5.0778	-1.20949		
Ubus Std >15-18t Euro-5	$y=\exp((a+(b/x))+(c*\ln(x)))$	2.64265	-4.89889	-1.19662		
Ubus Artic >18t 80ties	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)^d*x)))/d)$	33.14253	-0.04304	-2.47093	0.090938	
Ubus Artic >18t Euro-1	$y=\exp((a+(b/x))+(c*\ln(x)))$	4.773259	-4.41201	-0.98776		
Ubus Artic >18t Euro-2	$y=\exp((a+(b/x))+(c*\ln(x)))$	5.565393	-6.20136	-1.22873		
Ubus Artic >18t Euro-3	$y=\exp((a+(b/x))+(c*\ln(x)))$	5.494445	-6.32505	-1.20008		
Ubus Artic >18t Euro-4	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)^d*x)))/d)$	1.315256	-0.00082	-0.08257	0.069846	
Ubus Artic >18t Euro-5	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)^d*x)))/d)$	1.331807	-0.00098	-0.08496	0.07149	

Quadro A 27 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de NOx para veículos pesados de passageiros com 100% de carga [82].

Subsegment	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
Coach Std <=18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	25.18269	0.050272	114.3079	0.459938	8.884065
Coach Std <=18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	21.13912	0.053902	97.5687	0.407387	6.611405
Coach Std <=18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	24.06082	0.053578	85.64041	0.371084	7.037484
Coach Std <=18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	21.89258	0.051371	90.15757	0.248702	5.439391
Coach Std <=18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	12.37259	0.051009	47.80129	0.28146	3.38653
Coach Std <=18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	7.915238	0.051656	33.18285	0.262343	2.004661
Coach 3-Axes >18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	29.57995	0.044856	170.7281	0.484688	10.55911
Coach 3-Axes >18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	24.42093	0.047677	123.6348	0.42623	7.697781
Coach 3-Axes >18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	26.79065	0.04802	104.391	0.379469	8.073426
Coach 3-Axes >18t Euro-3	$y=((a*(x^b)))+(c*(x^d))$	3.629793	-0.02651	231.8404	-0.97679	
Coach 3-Axes >18t Euro-4	$y=((a*(x^b)))+(c*(x^d))$	89.25594	1.004138	-0.78272		
Coach 3-Axes >18t Euro-5	$y=(1/(a+(b*(x^c))))$	-0.06029	0.049303	0.525209		
Ubus Midi <=15t 80ties	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	22.01034	-0.07306	7.547903		
Ubus Midi <=15t Euro-1	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)^d*x)))/d)$	25.04253	-0.01921	-1.60843	0.08637	
Ubus Midi <=15t Euro-2	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)^d*x)))/d)$	27.73961	-0.02552	-1.88149	0.090738	
Ubus Midi <=15t Euro-3	$y=((a*(b*x)))+(c*(x^d))$	111.6259	1.004516	-0.86104		
Ubus Midi <=15t Euro-4	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)^d*x)))/d)$	19.20603	-0.0251	-1.71409	0.112908	
Ubus Midi <=15t Euro-5	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)^d*x)))/d)$	14.41077	-0.01872	-1.45524	0.122915	
Ubus Std >15-18t 80ties	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	31.75826	-0.06246	11.61703		
Ubus Std >15-18t Euro-1	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)^d*x)))/d)$	30.62368	-0.02205	-1.73243	0.077425	
Ubus Std >15-18t Euro-2	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)^d*x)))/d)$	34.40135	-0.03384	-2.13918	0.08467	
Ubus Std >15-18t Euro-3	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)^d*x)))/d)$	53.22189	-0.06362	-5.4343	0.123222	
Ubus Std >15-18t Euro-4	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)^d*x)))/d)$	23.457	-0.02992	-1.93182	0.105814	
Ubus Std >15-18t Euro-5	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)^d*x)))/d)$	17.47723	-0.02197	-1.65789	0.116798	
Ubus Artic >18t 80ties	$y=(a*(x^3)+(b*(x^2)))+(c*x)+d$	-0.00013	0.021971	-1.3637	46.38288	
Ubus Artic >18t Euro-1	$y=(a*(x^3)+(b*(x^2)))+(c*x)+d$	-0.00011	0.017984	-1.03687	31.17394	
Ubus Artic >18t Euro-2	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)^d*x)))/d)$	36.29923	-0.03673	-1.74478	0.069118	
Ubus Artic >18t Euro-3	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)^d*x)))/d)$	56.22678	-0.07843	-4.98365	0.111534	
Ubus Artic >18t Euro-4	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)^d*x)))/d)$	24.91316	-0.03709	-1.65289	0.090223	
Ubus Artic >18t Euro-5	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)^d*x)))/d)$	18.59363	-0.02765	-1.48889	0.102993	

Quadro A 28 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de PM para veículos pesados de passageiros com 100% de carga [82].

Subsegment	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
Coach Std <=18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1.535986	0.044106	3.290568	0.259813	0.29047
Coach Std <=18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1.2053	0.042163	1.602562	0.215669	0.202979
Coach Std <=18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.435708	0.042411	0.91444	0.282702	0.114918
Coach Std <=18t Euro-3	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.085296	1.072303	2.318671	1.066488	0.012891
Coach Std <=18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.147577	0.05249	0.461249	0.228733	0.020419
Coach Std <=18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.151511	0.052252	0.476518	0.22825	0.02089
Coach 3-Axes >18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1.680312	0.043691	4.836621	0.271423	0.363731
Coach 3-Axes >18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1.287088	0.042983	2.867643	0.243078	0.261276
Coach 3-Axes >18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.480609	0.040691	1.304105	0.295597	0.139392
Coach 3-Axes >18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.522973	0.038183	1.274698	0.167395	0.105076
Coach 3-Axes >18t Euro-4	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.01757	1.921561	-0.03114	0.997092	0.016688
Coach 3-Axes >18t Euro-5	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.01802	2.076187	-0.09604	0.990365	0.016981
Ubus Midi <=15t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	2.719314	0.059452	5.525816	0.278072	0.44328
Ubus Midi <=15t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.801181	0.058445	0.390029	0.179112	0.181697
Ubus Midi <=15t Euro-2	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	0.424161	-0.06547	0.095258		
Ubus Midi <=15t Euro-3	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	0.364465	-0.06406	0.083559		
Ubus Midi <=15t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.111962	0.064775	0.315642	0.30707	0.013837
Ubus Midi <=15t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.114931	0.065093	0.33028	0.311132	0.014159
Ubus Std >15-18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	2.08173	0.050463	3.7591	0.19152	0.355129
Ubus Std >15-18t Euro-1	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0.423619	0.063376	-0.00013		
Ubus Std >15-18t Euro-2	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	0.545675	-0.05722	0.122109		
Ubus Std >15-18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.458308	0.053486	761.2871	1.641426	0.096568
Ubus Std >15-18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.138234	0.059948	0.390748	0.298567	0.016242
Ubus Std >15-18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.140462	0.060056	0.40251	0.300479	0.016554
Ubus Artic >18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1.791191	0.038256	3.966837	0.135693	0.419165
Ubus Artic >18t Euro-1	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0.39948	0.047608	-0.00011		
Ubus Artic >18t Euro-2	$y=\exp((a/(b*x)))+(c*\ln(x))$	1.965461	-4.8008	-0.88111		
Ubus Artic >18t Euro-3	$y=(c+(a*\exp((-1)*b*x)))$	0.558096	0.05522	0.121562		
Ubus Artic >18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.166138	0.059664	0.410746	0.301384	0.017575
Ubus Artic >18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.167244	0.059402	0.420232	0.300782	0.017798

Quadro A 29 – Fórmulas para cálculo do factor de emissão de VOC para veículos pesados de passageiros com 100% de carga [82].

Subsegment	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
Coach Std <=18t 80ties	$y=(1/(a+(b*(x^c))))$	0.124242	0.015577	1.144531		
Coach Std <=18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	2.127062	0.037685	3.416394	0.147924	0.331888
Coach Std <=18t Euro-2	$y=(1/(a+(b*x)))$	0.168582	0.041599			
Coach Std <=18t Euro-3	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.230567	31.56159	-1.41139	0.588263	0.029437
Coach Std <=18t Euro-4	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.011195	2.034653	-1.42977	0.649306	0.027516
Coach Std <=18t Euro-5	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.011574	2.271656	-1.51773	0.646163	0.027399
Coach 3-Axes >18t 80ties	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.372745	16.18085	0.870544	0.941948	0.018179
Coach 3-Axes >18t Euro-1	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.400428	17.76877	0.205486	0.786937	0.021844
Coach 3-Axes >18t Euro-2	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.254576	23.0145	-0.69633	0.704979	0.024059
Coach 3-Axes >18t Euro-3	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.134533	4.608418	3.445273	1.657271	-0.00678
Coach 3-Axes >18t Euro-4	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.006126	0.266491	3.383979	1.667606	-0.00708
Coach 3-Axes >18t Euro-5	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0.006145	0.276061	3.364488	1.661506	-0.00718
Ubus Midi <=15t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	8.848929	0.060629	50.3899	0.423166	1.463489
Ubus Midi <=15t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1.630568	0.062487	14.15033	0.550588	0.320481
Ubus Midi <=15t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1.105219	0.063233	8.9474	0.525524	0.205217
Ubus Midi <=15t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.943119	0.062108	8.959862	0.5568	0.181427
Ubus Midi <=15t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.053332	0.062834	0.37213	0.489176	0.008697
Ubus Midi <=15t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.054737	0.062926	0.39267	0.493552	0.008947
Ubus Std >15-18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	5.232134	0.053578	27.89285	0.35567	0.709911
Ubus Std >15-18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1.967571	0.053349	12.07136	0.440122	0.34951
Ubus Std >15-18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1.380959	0.056934	10.94444	0.507326	0.234974
Ubus Std >15-18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1.161171	0.054279	9.782069	0.5111	0.200372
Ubus Std >15-18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.066223	0.055666	0.455846	0.465214	0.009515
Ubus Std >15-18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.067757	0.055822	0.46748	0.467549	0.009733
Ubus Artic >18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	5.519814	0.053787	29.40825	0.343732	0.725666
Ubus Artic >18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	2.116657	0.053647	11.84121	0.425116	0.398836
Ubus Artic >18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1.465394	0.057083	9.732082	0.47495	0.266826
Ubus Artic >18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1.226688	0.054434	8.739885	0.476874	0.220276
Ubus Artic >18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.069707	0.055694	0.420099	0.430236	0.010243
Ubus Artic >18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0.071306	0.055777	0.43592	0.434694	0.010424

Quadro A 30 – Fórmulas para cálculo do factor de consumo para veículos pesados de passageiros com 100% de carga [82].

Subsegment	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
Coach Std <=18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	736.5297	0.04998	2981.721	0.424495	201.1706
Coach Std <=18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	651.1765	0.048612	3902.733	0.47163	183.6788
Coach Std <=18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	599.2045	0.046256	4201.636	0.490142	180.2384
Coach Std <=18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	698.382	0.050636	4317.808	0.474916	196.4097
Coach Std <=18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	682.8782	0.051609	4446.98	0.474543	185.3314
Coach Std <=18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	710.4471	0.0516	4430.156	0.464623	189.4205
Coach 3-Axes >18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	879.8824	0.049305	5800.848	0.494953	248.0557
Coach 3-Axes >18t Euro-1	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	744.7776	0.047004	6813.24	0.536764	219.0958
Coach 3-Axes >18t Euro-2	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	696.7203	0.045729	8015.969	0.581264	215.8296
Coach 3-Axes >18t Euro-3	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	778.0151	0.045888	2054.296	0.304433	209.2699
Coach 3-Axes >18t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	753.6104	0.046965	2127.267	0.313172	197.1989
Coach 3-Axes >18t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	784.2209	0.047007	2171.496	0.306817	201.7755
Ubus Midi <=15t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	715.7514	0.074641	3209941	1.709771	196.7863
Ubus Midi <=15t Euro-1	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	569.5127	-0.07521	164.8318		
Ubus Midi <=15t Euro-2	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	503.41	-0.07251	160.5909		
Ubus Midi <=15t Euro-3	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	533.9155	-0.07281	168.027		
Ubus Midi <=15t Euro-4	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	490.2405	0.069565	23213461	2.123172	156.0216
Ubus Midi <=15t Euro-5	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	509.0588	0.069799	12830151	2.015594	159.1125
Ubus Std >15-18t 80ties	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	821.305	0.064838	1513488	1.54191	232.7544
Ubus Std >15-18t Euro-1	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	708.1367	-0.06701	208.8694		
Ubus Std >15-18t Euro-2	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	615.3534	-0.06289	204.1216		
Ubus Std >15-18t Euro-3	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	649.8008	-0.0633	211.3557		
Ubus Std >15-18t Euro-4	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	654.2474	0.066259	200.2038		
Ubus Std >15-18t Euro-5	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	678.2756	-0.06671	203.9342		
Ubus Artic >18t 80ties	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x))/d))$	1321.673	-1.28005	-70.3253	0.073886	
Ubus Artic >18t Euro-1	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	743.6589	-0.05534	260.8661		
Ubus Artic >18t Euro-2	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	646.0476	-0.04979	253.531		
Ubus Artic >18t Euro-3	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	676.1323	-0.05075	260.9267		
Ubus Artic >18t Euro-4	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	675.7683	-0.05343	247.4274		
Ubus Artic >18t Euro-5	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	698.5222	-0.05391	251.9823		

Quadro A 31 – Fórmulas de cálculo do factor de consumo para veículos ligeiros de passageiros a gasolina com normas anteriores às EURO [82].

Vehicle Class	Cylinder Capacity	Speed Range (km/h)	Fuel Consumption Factor (g/km)
PRE ECE	CC < 1.4 l	10-60	$521V^{-0.354}$
		60-80	55
		80-130	$0.386V + 24.143$
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-60	$681V^{-0.583}$
		60-80	67
		80-130	$0.471V + 29.286$
	CC > 2.0 l	10-60	$979V^{-0.628}$
		60-80	80
		80-130	$0.414V + 46.867$
ECE 15-00/01	CC < 1.4 l	10-60	$595V^{-0.63}$
		60-130	$95 - 1.324V + 0.0086V^2$
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-60	$864V^{-0.68}$
		60-130	$59 - 0.407V + 0.0042V^2$
	CC > 2.0 l	10-60	$1236V^{-0.764}$
		60-130	$65 - 0.407V + 0.0042V^2$
ECE 15-02/03	CC < 1.4 l	10-50	$544V^{-0.63}$
		50-130	$85 - 1.108V + 0.0077V^2$
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-50	$879V^{-0.72}$
		50-130	$71 - 0.7032V + 0.0059V^2$
	CC > 2.0 l	10-50	$1224V^{-0.756}$
		50-130	$111 - 1.333V + 0.0093V^2$
ECE 15-04	CC < 1.4 l	10-17.9	$296.7 - 80.21\ln(V)$
		17.9-130	$81.1 - 1.014V + 0.0068V^2$
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-22.3	$606.1V^{-0.667}$
		22.3-130	$102.5 - 1.364V + 0.0086V^2$
	CC > 2.0 l	10-60	$819.9V^{-0.663}$
		60-130	$41.7 + 0.122V + 0.0016V^2$

Quadro A 32 – Fórmulas de cálculo do factor de emissão de CO para veículos ligeiros de passageiros a gasolina com normas anteriores às EURO [82].

Vehicle Class	Engine Capacity	Speed Range (km/h)	CO Emission Factor (g/km)
PRE ECE	All capacities	10-100	$281V^{-0.630}$
	All capacities	100-130	$0.112V + 4.32$
ECE 15-00/01	All capacities	10-50	$313V^{-0.760}$
	All capacities	50-130	$27.22 - 0.406V + 0.0032V^2$
ECE 15-02	All capacities	10-60	$300V^{-0.797}$
	All capacities	60-130	$26.260 - 0.440V + 0.0026V^2$
ECE 15-03	All capacities	10-20	$161.36 - 45.62\ln(V)$
	All capacities	20-130	$37.92 - 0.680V + 0.00377V^2$
ECE 15-04	All capacities	10-60	$260.788 \cdot V^{-0.910}$
	All capacities	60-130	$14.653 - 0.220V + 0.001163V^2$

Quadro A 33 – Fórmulas de cálculo do factor de emissão de VOC para veículos ligeiros de passageiros a gasolina com normas anteriores às EURO [82].

Vehicle Class	Engine Capacity	Speed Range (km/h)	VOC Emission Factor (g/km)
PRE ECE	All capacities	10-100	$30.34V^{-0.693}$
	All capacities	100-130	1.247
ECE 15-00/01	All capacities	10-50	$24.99V^{-0.704}$
	All capacities	50-130	$4.85V^{-0.318}$
ECE 15-02/03	All capacities	10-60	$25.75V^{-0.714}$
	All capacities	60-130	$1.95 - 0.019V + 0.00009V^2$
ECE 15-04	All capacities	10-60	$19.079V^{-0.693}$
	All capacities	60-130	$2.608 - 0.037V + 0.000179V^2$

Quadro A 34 – Fórmulas de cálculo do factor de emissão de NOx para veículos ligeiros de passageiros a gasolina com normas anteriores às EURO [82].

Vehicle Class	Engine Capacity	Speed Range (km/h)	NO _x Emission Factor (g/km)
PRE ECE	CC < 1.41	10-130	$1.173 + 0.0225V - 0.00014V^2$
ECE 15-00/01	1.41 < CC < 2.01	10-130	$1.360 + 0.0217V - 0.00004V^2$
	CC > 2.01	10-130	$1.5 + 0.03V + 0.0001V^2$
ECE 15-02	CC < 1.41	10-130	$1.479 - 0.0037V + 0.00018V^2$
	1.41 < CC < 2.01	10-130	$1.663 - 0.0038V + 0.00020V^2$
	CC > 2.01	10-130	$1.87 - 0.0039V + 0.00022V^2$
ECE 15-03	CC < 1.41	10-130	$1.616 - 0.0084V + 0.00025V^2$
	1.41 < CC < 2.01	10-130	$1.29e^{0.0099V}$
	CC > 2.01	10-130	$2.784 - 0.0112V + 0.000294V^2$
ECE 15-04	CC < 1.41	10-130	$1.432 + 0.003V + 0.000097V^2$
	1.41 < CC < 2.01	10-130	$1.484 + 0.013 \cdot V + 0.000074V^2$
	CC > 2.01	10-130	$2.427 - 0.014V + 0.000266V^2$

Quadro A 35 – Constantes para o cálculo dos factores de emissão e do factor de consumo dos veículos ligeiros de passageiros a gasolina com normas EURO de acordo com a Equação 28 [82].

Pollutant	Emission Standard	Engine capacity	Speed Range (km/h)	R ²	a	b	c	d	e
CO	Euro 1	All capacities	10-130	0.87	1.12E+01	1.29E-01	-1.02E-01	-9.47E-04	6.77E-04
	Euro 2	All capacities	10-130	0.97	6.05E+01	3.50E+00	1.52E-01	-2.52E-02	-1.68E-04
	Euro 3	All capacities	10-130	0.97	7.17E+01	3.54E+01	1.14E+01	-2.48E-01	
	Euro 4	All capacities	10-130	0.93	1.36E-01	-1.41E-02	-8.91E-04	4.99E-05	
HC	Euro 1	All capacities	10-130	0.82	1.35E+00	1.78E-01	-6.77E-03	-1.27E-03	
	Euro 2	All capacities	10-130	0.95	4.11E+06	1.66E+06	-1.45E+04	-1.03E+04	
	Euro 3	All capacities	10-130	0.88	5.57E-02	3.65E-02	-1.10E-03	-1.88E-04	1.25E-05
	Euro 4	All capacities	10-130	0.10	1.18E-02		-3.47E-05		8.84E-07
NO _x	Euro 1	All capacities	10-130	0.86	5.25E-01		-1.00E-02		9.36E-05
	Euro 2	All capacities	10-130	0.52	2.84E-01	-2.34E-02	-8.69E-03	4.43E-04	1.14E-04
	Euro 3	All capacities	10-130	0.80	9.29E-02	-1.22E-02	-1.49E-03	3.97E-05	6.53E-06
	Euro 4	All capacities	10-130	0.71	1.06E-01		-1.58E-03		7.10E-06
FC	Euro 1	<1.4	10-130	0.99	1.91E+02	1.29E-01	1.17E+00	-7.23E-04	
		1.4-2.0	10-130	0.98	1.99E+02	8.92E-02	3.46E-01	-5.38E-04	
		>2.0	10-130	0.93	2.30E+02	6.94E-02	-4.26E-02	-4.46E-04	
	Euro 2	<1.4	10-130	0.99	2.08E+02	1.07E-01	-5.65E-01	-5.00E-04	1.43E-02
		1.4-2.0	10-130	0.98	3.47E+02	2.17E-01	2.73E+00	-9.11E-04	4.28E-03
		>2.0	10-130	0.98	1.54E+03	8.69E-01	1.91E+01	-3.63E-03	
	Euro 3	<1.4	10-130	0.99	1.70E+02	9.28E-02	4.18E-01	-4.52E-04	4.99E-03
		1.4-2.0	10-130	0.99	2.17E+02	9.60E-02	2.53E-01	-4.21E-04	9.65E-03
		>2.0	10-130	0.99	2.53E+02	9.02E-02	5.02E-01	-4.69E-04	
	Euro 4	<1.4	10-130	0.95	1.36E+02	2.60E-02	-1.65E+00	2.28E-04	3.12E-02
		1.4-2.0	10-130	0.96	1.74E+02	6.85E-02	3.64E-01	-2.47E-04	8.74E-03
		>2.0	10-130	0.98	2.85E+02	7.28E-02	-1.37E-01	-4.16E-04	